

# **ANÁLISIS DE LA MORFODINÁMICA DE LA BARRA DE SALAMANCA (DPTO. DEL MAGDALENA) DIAGNOSIS Y PROGNOSIS**

**ING. EDDIE LORA YEPES**



**UNIVERSIDAD  
DEL NORTE**

**UNIVERSIDAD DEL NORTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
BARRANQUILLA, COLOMBIA  
2015**

# **ANÁLISIS DE LA MORFODINÁMICA DE LA BARRA DE SALAMANCA (DPTO. DEL MAGDALENA) DIAGNOSIS Y PROGNOSIS**

**ING. EDDIE LORA YEPES**

**TRABAJO DE TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE MAGISTER EN  
INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN RECURSOS HÍDRICOS**

**DIRECTOR: ING. HUMBERTO ÁVILA, PHD**



**UNIVERSIDAD DEL NORTE  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
BARRANQUILLA, COLOMBIA  
2015**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

**PRESIDENTE DEL JURADO**

---

**JURADO**

---

**JURADO**

**BARRANQUILLA, JUNIO DE 2015**

## TABLA DE CONTENIDO

Pág.

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	15
1.3. OBJETIVOS.....	16
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.4. ESTADO DEL ARTE .....	16
1.4.1. MORFODINÁMICA COSTERA Y LINEA DE COSTA.....	16
1.4.2. ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE LA BARRA DE ISLA SALAMANCA.....	17
<b>2. ANALISIS DE LA MORFODINAMICA DE LA BARRA A TRAVES DE LA DIAGNOSIS.....</b>	<b>19</b>
2.1. GENERALIDADES DE LAS BARRAS.....	20
2.2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	22
2.2.1. LOCALIZACIÓN GENERAL.....	22
2.2.2. INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA. ....	25
2.2.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.....	26
1.1.1. <i>Planos de Inundación (bajos de inundación, Cubetas de derrame, Swale).</i> .....	33
1.1.2. <i>Pantano intermareal.</i> .....	33
1.1.3. <i>Dunas.</i> .....	34
2.2.4. CARACTERISTICAS BATIMETRICAS. ....	35
2.3. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN LA BARRA DE SALAMANCA ...	36
2.3.1. ASPECTOS HISTÓRICOS. ....	36
2.3.2. CONFORMACIÓN DEL PARQUE E INFRAESTRUTURA ACTUAL. ....	39
2.3.3. PRINCIPALES CAMBIOS DE LA LÍNEA DE COSTA EN LA ISLA BARRA DE SALAMANCA.	43
2.4. ANÁLISIS DEL CLIMA MARÍTIMO .....	49
2.4.1. NIVEL MEDIO DEL MAR .....	50
2.4.2. VIENTO .....	54
2.4.3. OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS.....	60
2.4.4. OLEAJE FRENTE A LA COSTA.....	71
2.5. ANÁLISIS DE LA DINÁMICA LITORAL .....	96



2.5.1.	PROFUNDIDAD DE CIERRE.....	96
2.5.2.	CARACTERISTICAS DE LOS SEDIMENTOS.....	97
2.5.3.	PERFILES DE PLAYA.....	116
2.5.4.	TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS. ....	130
2.6.	CONCLUSIONES DE LA DIAGNOSIS.....	138
2.6.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL.....	138
2.6.2.	CAUSAS DEL RETROCESO DE LA LINEA DE COSTA.....	142
<b>3.</b>	<b>ANÁLISIS MORFODINAMICO DE LA BARRA A TRAVES DE LA PROGNOSIS .....</b>	<b>150</b>
3.1.	GENERALIDADES .....	150
3.1.1.	Análisis de la playa de equilibrio.....	151
3.1.2.	Forma en planta de equilibrio.....	152
3.2.	DETERMINACION DE LA FORMA EN PLANTA DE EQUILIBRIO PARA LA ZONA DE ESTUDIO 155	
3.3.	MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA .....	156
3.3.1.	Descripción del modelo numérico. ....	156
3.3.2.	Calibrado del modelo.....	160
3.3.3.	Validación del modelo.....	172
3.3.4.	Determinación de la evolución futura de la línea de costa. ....	176
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>184</b>
4.1.	CONCLUSIONES .....	184
4.2.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	185
4.3.	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION .....	186
<b>5.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>187</b>

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1-1. Límite Vía Parque Isla de Salamanca.....	14
Figura 2-1. Imagen de Barra-, Egg Island, Alaska (en el delta del río Copper).....	21
Figura 2-2. Ilustración de cómo se puede crear una barra .....	22
Figura 2-3. Localización general de la zona de estudio.....	23
Figura 2-4. Localización general de la zona de estudio.....	23
Figura 2-5.Red de gasoductos nacionales de Colombia.....	24
Figura 2-6.Rosa de vientos para la ciudad de Santa Marta.....	25
Figura 2-7.Mapa geológico de la zona de estudio. ....	28
Figura 2-8. Unidades Geológicas representadas en el mapa Geológico.....	29
Figura 2-9, Mapa Geomorfológico de la franja costera del departamento del Magdalena. ....	30
Figura 2-10.Mapa geomorfológico de la Zona de Estudio.....	31
Figura 2-11.Perfil Esquemático de la Barra de Salamanca.....	35
Figura 2-12.Batimetría de la zona de estudio (Carta náutica COL 407).....	36
Figura 2-13.Mapa de las diferentes posiciones que ha tenido la desembocadura del río Magdalena desde el Pleistoceno .....	37
Figura 2-14.Cartografía antigua del río Magdalena mostrando su evolución para el periodo 1803 – 1817.....	38
Figura 2-15. Carta del departamento de la Magdalena. Grabado en París por Darmet, 1827.....	39
Figura 2-16. Límite Vía Parque Isla de Salamanca.....	40
Figura 2-17. Zona Ramsar. ....	41
Figura 2-18. Trazado vía Barranquilla – Santa Marta.....	42
Figura 2-19. Presencia de Lóbulos en el sector de la Isla de Salamanca.....	43
Figura 2-20. Reconstrucción de la línea de costa hasta ante de 1900.....	44
Figura 2-21. Fotografía 1936 (E. Acevedo).....	45
Figura 2-22. Reconstrucción barra de sedimentos 1908 a 1968.....	46
Figura 2-23. Variación de la línea de costa en la barra de Salamanca entre 1953 y 2013. ....	47
Figura 2-24. Variación de la línea de costa en los periodos 2002-2010 y 2010-2014.....	49
Figura 2-25. Ubicación Mareógrafo de Cartagena.....	50
Figura 2-26. Zona de generación del ascenso del nivel medio del mar en la zona de proyecto debido a vientos de dirección NE y ENE. Longitud media fetch = 50 km. ....	53
Figura 2-27. Imagen aérea con la localización del punto de referencia del registro de datos y del presente proyecto.....	54
Figura 2-28. Rosa de viento anual.....	55
Figura 2-29. Régimen medio de la velocidad de viento, por meses. ....	60
Figura 2-30. Localización de las fuentes de datos de oleaje.....	61
Figura 2-31. Rosas de oleaje anual. Nodos NE (arriba) y NW (abajo).....	63
Figura 2-32. Rosas de oleaje en aguas profundas posicionadas sobre imagen satelital y carta náutica.....	64
Figura 2-33. Diagrama de dispersión entre las variables altura de ola y periodo de pico. Datos Conjunto a propagar, datos totales. ....	65
Figura 2-34. Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa (Hs) y el período de pico (Tp). Sector ENE. ....	66

Figura 2-35. Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector NE. ....	66
Figura 2-36. Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector NW. ....	67
Figura 2-37. Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector ENE. ....	67
Figura 2-38. Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector NNW. ....	68
Figura 2-39. Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector NW. ....	68
Figura 2-40. Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector WNW. ....	69
Figura 2-41. Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector W. ....	69
Figura 2-42. Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector WSW. ....	70
Figura 2-43. Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector SW. ....	70
Figura 2-44. Carta náutica y batimetría de la zona de estudio de propagación del oleaje. La zona coloreada en azul muestra las aguas someras, con profundidades inferiores a 20 m. En círculo rojo se señala el emplazamiento del proyecto (K19). ....	72
Figura 2-45. Batimetría digitalizada. ....	73
Figura 2-46. Marco de malla general para los oleajes de los sectores NE (ENE, NE, NNE y N) y NW (NNW, NW y WNW). ....	79
Figura 2-47. Marco de malla tipo SW para los oleajes de los sectores W, WSW y SW. ....	80
Figura 2-48. Distribución del coeficiente adimensional de propagación $K_p=H_s/H_{s,o}$ y del ángulo medio de incidencia. Oleaje sector NE. $H_{s,o}=1,0$ m. $T_p=5$ s. ....	82
Figura 2-49. Distribución del coeficiente adimensional de propagación $K_p=H_s/H_{s,o}$ y del ángulo medio de incidencia. Oleaje sector NE. $H_{s,o}=1,0$ m. $T_p=12$ s. ....	83
Figura 2-50. Distribución del coeficiente adimensional de propagación $K_p=H_s/H_{s,o}$ y del ángulo medio de incidencia. Oleaje NW. $H_{s,o}=1,0$ m. $T_p=8$ s. ....	83
Figura 2-51. Distribución del coeficiente adimensional de propagación $K_p=H_s/H_{s,o}$ y del ángulo medio de incidencia. Oleaje W $H_{s,o}=1,0$ m. $T_p=6$ s. ....	84
Figura 2-52. Distribución del coeficiente adimensional de propagación $K_p=H_s/H_{s,o}$ y del ángulo medio de incidencia. Oleaje SW $H_{s,o}=1,0$ m. $T_p=4$ s. ....	84
Figura 2-53. Localización de las boyas virtuales de propagación frente a la obra. ....	85
Figura 2-54. Distribución de las rosas de oleaje a lo largo de la costa (a una profundidad de 8 m). ....	86
Figura 2-55. Variación de los parámetros estadísticos del oleaje a lo largo de la costa. ....	87
Figura 2-56. Régimen medio de la altura de ola, por meses. (Sector KM-19). ....	90
Figura 2-57. Altura de ola y dirección de temporales con alturas de ola por encima de 2,2 m. ...	93
Figura 2-58. Régimen extremal de datos sobre umbral 2,2 m. Datos propagados a la boya 0. ...	95
Figura 2-59. Variación de la profundidad de cierre a lo largo de la costa. ....	97
Figura 2-60. Curva granulométrica muestra perfil de playa de Miramar: Muestra playa seca ....	98
Figura 2-61. Curva granulométrica muestra perfil de playa de Miramar: Línea de mar. ....	99

Figura 2-62. Curva granulométrica muestra perfil de playa de Miramar: Muestra Sumergida. (Fuente: SISCO INGENIERIA – Alcaldía de Ciénaga). .....	99
Figura 2-63. Curva granulométrica muestra playa seca espolón de Costa Verde. (Fuente: SISCO INGENIERIA – Alcaldía de Ciénaga). .....	100
Figura 2-64. Cálculo de los estadísticos utilizando el programa GRADISTAT para la muestra sedimentología KM 55 - MUESTRA 04. ....	101
Figura 2-65. Curva de acumulación de la muestra KM 55 - MUESTRA 04. ....	102
Figura 2-66. Cálculo de los estadísticos utilizando el programa GRADISTAT para la muestra sedimentología KM 55 - MUESTRA 05. ....	103
Figura 2-67. Curva de acumulación de la muestra KM 55 - MUESTRA 05. ....	104
Figura 2-68. Localización de la zona de toma de muestra de sedimentos Km 19. ....	105
Figura 2-69. Curva granulométrica perfil K2+000 sumergida .....	106
Figura 2-70. Curva granulométrica perfil K2+000 playa. ....	106
Figura 2-71. Curva granulométrica perfil K2+000 orilla. ....	107
Figura 2-72. Localización de la zona de toma de muestra de sedimentos en la desembocadura río Magdalena. ....	108
Figura 2-73. Curva granulométrica perfil 2 orilla. ....	109
Figura 2-74. Curva granulométrica perfil 2 playa.....	109
Figura 2-75. Curva granulométrica perfil 2 overwash.....	110
Figura 2-76. Curva granulométrica perfil 2 Duna.....	110
Figura 2-77. Ubicación de muestras de sedimentos. ....	111
Figura 2-78. Curva granulométrica muestra M4.....	112
Figura 2-79. Curva granulométrica muestra M5.....	112
Figura 2-80. Curva granulométrica muestra M6.....	113
Figura 2-81. Curva granulométrica muestra M7.....	113
Figura 2-82. Curva Granulométrica muestra M9. ....	114
Figura 2-83. Curva Granulométrica muestra M11. ....	114
Figura 2-84. Curva Gránulométrica muestra M12 .....	115
Figura 2-85. Curva Granulométrica muestra M13. ....	115
Figura 2-86. Perfil de equilibrio teórico de DEAN ( $D_{50} = 0.3 \text{ mm}$ ). ....	117
Figura 2-87. Planta de ubicación de las trazas de perfiles analizados. ....	118
Figura 2-88. Comparativo Perfil 1 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean ( $D_{50} = 0.3 \text{ mm}$ ). ....	119
Figura 2-89. Comparativo Perfil 2 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean ( $D_{50} = 0.3 \text{ mm}$ ). ....	119
Figura 2-90. Comparativo Perfil 3 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean ( $D_{50} = 0.3 \text{ mm}$ ). ....	120
Figura 2-91. Comparativo Perfil 4 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean ( $D_{50} = 0.3 \text{ mm}$ ). ....	120
Figura 2-92. Comparativo Perfil 5 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean ( $D_{50} = 0.3 \text{ mm}$ ). ....	121
Figura 2-93. Comparativo Perfil 6 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean ( $D_{50} = 0.3 \text{ mm}$ ). ....	121
Figura 2-94. Comparativo Perfil 7 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean ( $D_{50} = 0.3 \text{ mm}$ ). ....	122
Figura 2-95. Comparativo Perfil 8 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean ( $D_{50} = 0.3 \text{ mm}$ ). ....	122
Figura 2-96. Ubicación perfiles de equilibrio en el sector de estudio.....	123
Figura 2-97. Perfil de equilibrio No. 1 .....	124
Figura 2-98. Perfil de Equilibrio No. 2. ....	124
Figura 2-99. Perfil de equilibrio No. 3. ....	125
Figura 2-100. Perfil de equilibrio No. 4. ....	125
Figura 2-101. Perfil de equilibrio No. 5. ....	126
Figura 2-102. Perfil de equilibrio No. 6. ....	126

Figura 2-103. Perfil de equilibrio No. 7. ....	127
Figura 2-104. Perfil de equilibrio No. 8. ....	127
Figura 2-105. Perfil de equilibrio No. 9. ....	128
Figura 2-106. Perfil de equilibrio No. 10. ....	128
Figura 2-107. Perfil de equilibrio No. 11. ....	129
Figura 2-108. Perfil de equilibrio No. 12. ....	129
Figura 2-109. Perfil de equilibrio No. 13. ....	130
Figura 2-110. Patrón general de la dinámica sedimentaria longitudinal a lo largo de la costa (Aumento del transporte Esta a Oeste). ....	131
Figura 2-111. Variación de las tasas de transporte longitudinal neto anual a lo largo de la costa. ....	138
Figura 2-112. Presencia de Lóbulos en el sector de la Isla de Salamanca.....	139
Figura 2-113. Carta náutica y batimetría de la zona .....	139
Figura 2-114. Variación de la línea de costa en los periodos 2002-2010 y 2010-2014.....	141
Figura 2-115. Barra marina en Bocas de Cenizas. ....	142
Figura 2-116. Rasgos morfodinámicos en cordones litorales presentes en la barra. ....	143
Figura 2-117. Distribución del coeficiente adimensional de propagación $K_p=H_s/H_{s,o}$ y del ángulo medio de incidencia. Oleaje sector NE. $H_{s,o}= 1,0$ m. $T_p= 5$ s. ....	144
Figura 2-118. Variación de los parámetros estadísticos del oleaje a lo largo de la costa.....	145
Figura 2-119. Diagrama de dispersión $H_s - T_p$ y caracterización de los oleajes en la zona de estudio. ....	145
Figura 2-120. Régimen medio de la altura de ola, por meses .....	146
Figura 2-121. Variación de las tasas de transporte longitudinal neto anual a lo largo de la costa. ....	147
Figura 2-122. Comparativo Perfil 4 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean ( $D_{50}= 0.3$ mm). ....	148
Figura 2-123. Modelo representativo de cajas ("Box Model"). Tramo del K0.....	148
Figura 2-124. Variación de la línea de costa entre 1984 – 2013 en el kilómetro 19 .....	149
Figura 3-1. Escalas espaciales y temporales típicas para algunos cambios morfológicos. ....	151
Figura 3-2. Forma en planta de equilibrio.....	153
Figura 3-3. Metodología de cálculo de una playa en equilibrio.....	154
Figura 3-4. Planta de Equilibrio en la zona de estudio.....	155
Figura 3-5. Dominio de simulación del modelo (entre líneas azules, $X = -4.55$ km a $X = +5.10$ km), y ejes de coordenadas (naranja-verde). ....	159
Figura 3-6. Boyas seleccionadas.....	161
Figura 3-7. Calibración del modelo – tanteo inicial. Posición de línea de orilla. ....	163
Figura 3-8. Calibración del modelo – tanteo inicial. Variación línea de orilla.....	164
Figura 3-9. Calibración del modelo – tanteo inicial. Transporte longitudinal de sedimentos. ....	165
Figura 3-10. Perfiles medidos y de equilibrio correspondientes a la línea de orilla actual .....	166
Figura 3-11. Relación entre pérdida de volumen y retroceso de la línea de costa, en función de la profundidad de cierre del perfil de playa. ....	167
Figura 3-12. Calibración del modelo. Posición de línea de orilla. ....	169
Figura 3-13. Calibración del modelo. Variación línea de orilla. ....	170
Figura 3-14. Calibración del modelo. Transporte longitudinal de sedimentos.....	171
Figura 3-15. Sistema de cordón dunar (barra) al oeste del Km-19. ....	172
Figura 3-16. Validación del modelo. Posición de línea de orilla. ....	173
Figura 3-17. Validación del modelo. Variación línea de orilla.....	174

Figura 3-18. Validación del modelo. Transporte longitudinal de sedimentos. ....	175
Figura 3-19. Variación del transporte longitudinal de sedimentos partir de la evaluación de la línea de orilla. ....	177
Figura 3-20. Variación de la línea de orilla con respecto a la de referencia. ....	178
Figura 3-21. Variación del transporte longitudinal de sedimentos. ....	179
Figura 3-22. Variación Línea de Orilla en el tiempo tramos Abscisas K0 a K+25 .....	180
Figura 3-23. Variación Línea de Orilla en el tiempo tramos Abscisas K0 a K-25. ....	182

## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 2-1. Unidades Geológicas representadas en el mapa Geológico. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
Tabla 2-2. Unidades Geomorfológicas representadas en el mapa Geológico. G. Vargas. UNINORTE. ....	32
Tabla 2-3. Principales componentes de marea en Cartagena de Indias registros 1990 – 2000 (Molares R, 2004. Clasificación e identificación de los componentes de marea del Caribe colombiano. Boletín científico CIOH, No 22, pp. 105 -114. ....	51
Tabla 2-4. Tabla de presentación sectorial del viento (anual). ....	57
Tabla 2-5. Umbrales de velocidad de viento asociados a probabilidad de no excedencia, datos totales. ....	58
Tabla 2-6. Umbrales de velocidad de viento asociados a probabilidad de no excedencia, para cada mes. ....	59
Tabla 2-7. Tabla de presentación sectorial del oleaje nodo “NE”. ....	62
Tabla 2-8. Tabla de presentación sectorial del oleaje nodo “NW”. ....	62
Tabla 2-9. Características de los oleajes simulados en la propagación. ....	81
Tabla 2-10. Variación de los oleajes a lo largo de la costa. ....	87
Tabla 2-11. Umbrales de altura de ola significativa asociados a probabilidad de no excedencia, para cada mes. Sector KM-19. ....	89
Tabla 2-12. Alturas de ola significantes correspondientes a periodos de retorno de interés. ....	94
Tabla 2-13. Resultados granulométricos, valores D50 (mm) para la zona KM-19. ....	105
Tabla 2-14. Resultados granulométrico, valores $D_{50}$ para la zona de la desembocadura del río Magdalena. ....	108
Tabla 2-15. Cálculo de tasas neta de transporte de sedimentos. ....	137
Tabla 3-1. . Profundidad de Hallermeier en los puntos de propagación del oleaje. ....	161

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1.	RESULTADOS PROPAGACIÓN DE OLAJE SMS.
----------	--------------------------------------

## SUMMARY

This paper shows the main factors that affect the barrier beach morfodinamics in the coast engineering, through the application of a specific case in the Salamanca Barrier in the Colombian department of Magdalena, in a section of 60 km.

The Salamanca Barrier form a part of the coastline between the municipality of Barranquilla (Atlántico Department) and the municipality of Ciénaga and Pueblo Viejo (Magdalena Department), it makes part of the Natural National Park named “Via Parque Isla de Salamanca”. The zone is characterized by a marine bar, where we find playones and ciénagas interconnected by Canals in The mangle zone. It makes part of the lagunar system of the Ciénaga Grande of Santa Marta, To which flow of freshwater arrive through part of the Magdalena River and salt water through the mouth that connect with te sea. The Salamanca Bar, finds itself in a process of natural erosion, which has been getting worse in the last years, to a point of affecting the existing infrastructure of the municipalities that are affected.

The investigation has been structured in two well differenced parts, to which numeric tools were used. The first part, belongs to a Diagnosis, where the main aspects that influence morphodynamics of the bar are known, associated to studies of historical evolution of the coast line, geology and geomorphology, bathymetries, marine weather (wind and waves) and analysis of the litoral dynamics. After this, Prognosis is done, to stablish the flow tendency of the bar with the studies like an equilibrium plant and the application of a long-term sediment transportation model.

The investigation results show that the bar in study, presents a special condition which separates it from other littoral bars, and this is because it is in an zone that constitutes the old delta of Magdalena River affected by a low depth platform that affects in it's morphological changes. The erosive processes of the Salamanca Bar, are due mainly to natural processes, associated to the waves in a coast section with abundance of sediments, given by the old delta of the Magdalena river, and the lack of recent supply of sediment by part of the system. The changes in the coast line have occurred since more tan 100 years ago, being visible in the last decade because it has been affected in part of the existing infrastructure. The causes of the coast line retreat, are due to two well known processes: one that deals with the retreat of the bar due to direct wave action when high storm are presented, that exceed the low height of bar, and the one associated to variation of the longshore transport, this last one being the most important due to the marine weather characteristics in the study zone. The models of the equilibrium plant and the numerical simulations in the long-term, show that there is a section of the bar next to the equilibrium to the next 10 years in the first 20 km, where erosive processes will decrease, meanwhile in other sections, this condition will not be obtained, in a temporary scale of 100 years.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación muestra los principales factores que influye en la morfodinámica de barras en la ingeniería costera, a través de la aplicación en un caso específico en la Barra de Salamanca en el departamento del Magdalena en Colombia, en un tramo de 60 km.

La Barra de Salamanca constituye el borde costero entre el Municipio de Barranquilla (Departamento de Atlántico) y los municipios de Ciénaga y Pueblo Viejo (Departamento del Magdalena), hace parte del Parque Natural Nacional de nombre “Vía Parque Isla de Salamanca”. La zona se caracteriza por una barra marina, en donde existen playones y ciénagas interconectadas por canales en zonas de manglar. Hace parte del sistema lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta, al cual llegan flujos de agua dulce por parte del río Magdalena y de agua salada por las bocas que se conectan con el mar. La Barra de Salamanca, se encuentra en un proceso de erosión natural, el cual se ha venido agravando en los últimos años, a tal manera de afectar la infraestructura existente de los municipios donde se ubican.

La investigación se ha estructurado en dos partes bien diferenciadas, para lo cual se utilizaron herramientas numéricas. La primera parte, corresponde a una Diagnósis, en donde se conocen los principales aspectos que influyen en la morfodinámica de la barra, asociados a estudios de evolución histórica de la línea de costa, geología y geomorfología, batimetrías, clima marítimo (vientos y oleajes) y análisis de la dinámica litoral. Seguidamente se realiza la Prognosis, a tal manera de establecer la tendencia a futuro de la barra con los estudios de forma en planta de equilibrio y la aplicación de un modelo de transporte de sedimentos en largo plazo.

Los resultados de la investigación muestra que la barra en estudio, presenta una condición especial a diferencia de otras barras litorales, y esto se debe a que se ubica en una zona que hace parte del antiguo delta del río Magdalena afectado por una plataforma de baja profundidad que influye en sus cambios morfológicos. Los procesos erosivos de la barra de Salamanca, se deben principalmente a procesos naturales, asociados a la acción del oleaje en un tramo costero con abundancia de sedimentos aportados de las antiguas desembocaduras del río Magdalena, y la falta de suministro actual de sedimentos por parte del sistema. Los cambios en la línea de costa se han producidos desde hace más de 100 años, siendo visible en la última década debido a que ha sido afectada en parte de la infraestructura existente. Las causas del retroceso de la línea de costa, se deben a dos procesos bien identificados: el que tiene que ver con el retroceso de la barra por la acción directa del oleaje cuando se presenta grandes temporales, que sobrepasan la baja cota de la barra, y el asociado a la variación del transporte longitudinal de sedimentos, siendo este último el más importante por las características del clima marítimo presente en la



zona de estudio. Los modelos de planta de equilibrio y simulaciones numéricas en el largo plazo, muestra que hay un tramo de la barra próximo al equilibrio hacia los siguientes 10 años en los primeros 20 km, en donde se disminuirán los procesos erosivos, mientras que en otros no se llegaran a esta condición, en una escala temporal de hasta 100 años.

## 1. INTRODUCCIÓN

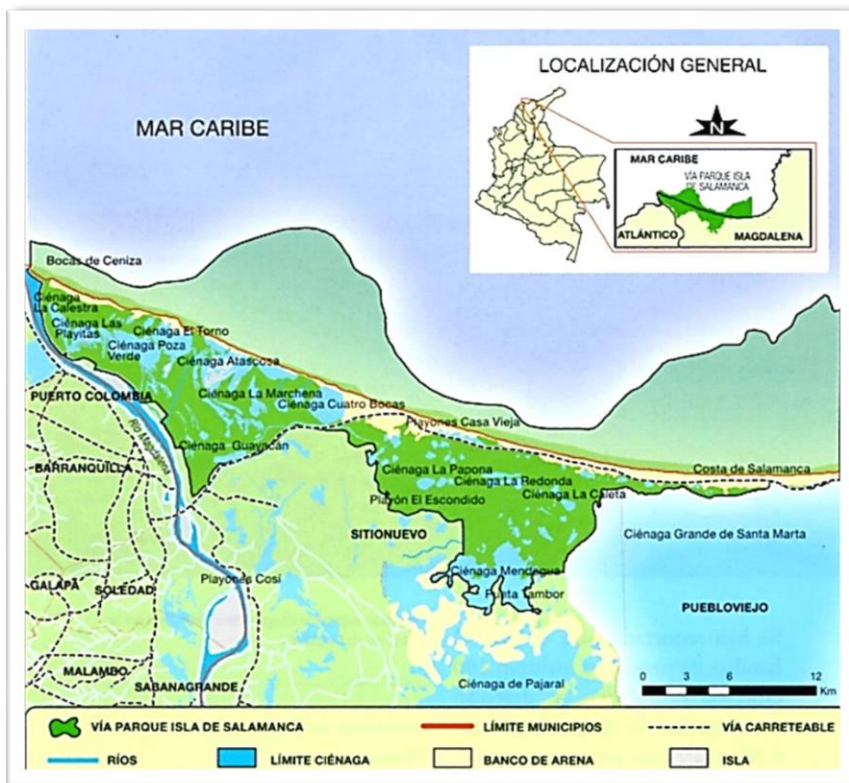
Las barras, constituyen un tipo de costa en ingeniería costera que actúan como una barrera flexible de los oleajes y corrientes y sirve como reserva de arena para la línea de costa. La dinámica de las barras, muestran un movimiento migratorio hacia tierra o hacia el mar que depende de las dinámicas actuantes que definen la costa como lo son: el oleaje, corrientes y transporte de sedimentos.

El conocimiento del estudio de la dinámica de barras, se encuentra en desarrollo actualmente a través de modelos teóricos que ayuden a entender la evolución de la costa, integrando las dinámicas y luego definiendo tendencias que permitan valorar su comportamiento a futuro.

El presente trabajo investigativo, muestra los principales factores que influye en la morfodinámica de barras en la ingeniería costera, a través de la aplicación en un caso específico en la Barra de Salamanca en el departamento del Magdalena en Colombia, en un sector de 60 km.

La Barra de Salamanca, constituye el borde costero entre el Municipio de Barranquilla (Departamento de Atlántico) y los municipios de Ciénaga y Pueblo Viejo (Departamento del Magdalena), en el límite del Parque Natural Nacional de nombre “Vía Parque Isla de Salamanca”. La zona se caracteriza por una barra marina, en donde existen playones y ciénagas interconectadas por canales en zonas de manglar. Esta zona hace parte del sistema lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta, al cual llegan flujos de agua dulce por parte del río Magdalena y de agua salada por las bocas que se conectan con el mar. Ver Figura 1-1

**Figura 1-1. Límite Vía Parque Isla de Salamanca.**



*Fuente: Parques Nacionales.*

El “Vía Parque de Isla de Salamanca”, recibe este nombre porque se localiza la vía que conduce de Barranquilla a Santa Marta (Ruta 90), la cual fue construida en la década de los 60’s. Hasta la fecha, se desconoce los criterios por el cual se estableció el trazado de la vía, pero fue cuestionada en su momento debido a que su construcción interrumpió el flujo hídrico natural de agua dulce y salada.

Hoy en día la barra de Salamanca, se encuentra en un proceso de erosión natural, el cual se ha venido agravando en los últimos años. Se han presentado serias afectaciones en sectores de la costa de los municipios Ciénaga y Pueblo Viejo, así como en la vía (ruta 90) siendo esta última de gran importancia a nivel nacional ya que comunica los puertos de la costa Atlántica con el Interior del País, además se encuentran en riesgo otras infraestructuras importantes como lo son: la tubería de gas regional y el cable de fibra óptica.

La importancia del trabajo a nivel investigativo, político y social, se refiere a que la investigación constituye un avance en los estudios de ingeniería costera en morfodinámica de barras, y genera información que puede ser aplicada para futuras investigaciones y/o desarrollos sociales en la zona de estudio.

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El estudio de barras en ingeniería costera depende de las condiciones locales que influye en su dinámica, asociadas a los oleajes, corrientes y disponibilidad de sedimentos. El conocimiento de la evolución de las barras y la determinación de los principales efectos, constituye en sí mismo en un elemento investigativo que vale la pena estudiar. La barra de Salamanca, por estar situada en una zona que corresponde a un antiguo delta del río Magdalena, presenta condiciones morfológicas propias, por lo que su conocimiento ayudará a entender el comportamiento morfodinámico en este tipo de costa.

No existe en la actualidad para la zona de estudio, una investigación desde el punto de vista de ingeniería costera que integre todas las dinámicas actuantes del comportamiento de la barra para conocer y entender a qué se debe su evolución y mucho menos de definir una tendencia a futuro.

### **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Existe la necesidad de avanzar en el conocimiento de las barras como tipo de costa en ingeniería costera. La selección de la zona caso de estudio, permitirá valorar la identificación de las principales dinámicas actuantes que influye en el comportamiento morfodinámico de esta barra y establecer tendencias a futuro.

La zona de estudio, presenta un alto valor para la región y el país, por la presencia de un parque nacional, la vía que comunica a Barranquilla con Santa Marta y el interior del país y la infraestructura a nivel nacional como la línea de gas y el cable de fibra óptica entre otras.

La investigación será un aporte a la comunidad científica general y local, a tal manera de contar con un estudio de ingeniería costera, propio aplicativo a una barra con condiciones específicas, y de apoyo a futuras líneas de investigación para estudios similares.

Para el caso de las autoridades locales y comunidad en general, por el alto valor que representa la zona de estudio, servirá de guía para el planteamiento de futuras investigaciones que permitan el desarrollo socio-económico de la región con el planteamiento de infraestructuras que no sean afectadas por procesos de erosión costera en la zona de la barra.

El desarrollo a futuro en el Vía Parque Isla de Salamanca, involucra la construcción de una nueva vía en doble calzada, los fortalecimientos de la red de infraestructura como el gas y cable de fibra óptica y la conservación del Parque Nacional.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Identificar y analizar los principales factores que inciden en la morfodinamica de la barra Isla de Salamanca orientado a determinar tendencias futuras de la línea de costa.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Los objetivos específicos planteados para lograr el objetivo general, se describen a continuación:

- Describir la problemática de la evolución histórica de la línea de costa y determinación de las principales causas de erosión en la barra
- Analizar el clima marítimo y dinámica marina en la zona de estudio
- Analizar la dinámica litoral en la zona de estudio
- Desarrollar un diagnóstico (Diagnosis) de las causas de la erosión en la Barra de Salamanca
- Estimar tendencias futuras (Prognosis) de la Barra de Salamanca a situación futura

### **1.4. ESTADO DEL ARTE**

#### **1.4.1. MORFODINÁMICA COSTERA Y LINEA DE COSTA**

(1954) BRUNN, «Coast erosion and the development of beach profiles»

(1960): SILVESTER, R. «Stabilization of Sedimentary Coastlines»,

(1977): DEAN, R. G. «Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and gulf coasts»

(1984) Shore protection Manual

(1989): HSU, J. R. C. and C. EVANS «Parabolic Bay Shapes and Applications

(1989) Hanson & Kraus,. "GENESIS, Generalized Model for Simulating Shoreline Changes

(1994): KOMAR, P. D. and W. G. MCDUGAL The analysis of exponential beach profiles

(1995) GONZÁLEZ, E. M.): Morfología de Playas en Equilibrio: Planta y Perfil. Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria. Santander.

A. Sanchez-Arcilla', JA. Jiménez (1997), Evolución del delta del Ebro.

(2001) R. MEDINA, C. VIDAL, M. GONZÁLEZ, 2001. Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de «Equilibrio» Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas.

(2003), the Slapton Line Partnership (<http://www.slaptonlinepartnership.co.uk/>) commissioned a major study to make a comprehensive evaluation of the issues relating to coastal processes at Slapton Sands.

LEO C. VAN RIJIN –S BOER (2006) «the effects of grain size and bottom slope on sand transport in the coastal zone. Realiza un análisis en donde se incluye las ecuaciones de transporte de sedimentos mas usadas, CERC, Kampuis y Van Rijn.

LEO C. VAN RIJIN, (2013). LONGSHORE SAND TRANSPORT

#### **1.4.2. ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE LA BARRA DE ISLA SALAMANCA**

(1973) Los primeros trabajos que se conocen para la zona del Barra de Salamanca fueron realizados por el Dr. Axel von Erffa, en su conocido trabajo “LA SEDIMENTACIÓN, EL TRANSPORTE Y LA EROSIÓN EN LA COSTA NORTE DE COLOMBIA ENTRE BARRANQUILLA Y LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA

(2003) El Centro de Investigaciones Oceanográfica – CIOH un estudio donde identifica para el sector de la Barra de Salamanca los sitios en los cuales se presenta erosión, realizando un análisis con base en la evolución de la costa para estimar las tasas de erosión e incluye información general de oleaje.

(2008) El Instituto de Investigaciones Marinas y Costera –INVEMAR, realiza en el 2008, el Estudio “Diagnostico de la Erosión en la zona costera del Caribe Colombiano”, basado principalmente en la recopilación de datos históricos, estudios geomorfológicos y geológicos.

(2010) La Gobernación del Magdalena 2010 (AQUA & TERRA – OCEANMET LTDA), realizó los “Estudios y Diseños para la construcción de Estructuras de Protección Costera para controlar los procesos erosivos entre Bocas de Ceniza y Punta Betín”, que incluye Estudios Oceanográficos, Meteorológicos, Batimétricos y Geomorfológicos, que fueron enfocados a la protección de tres sectores en el borde costero entre Bocas de Cenizas y el Municipio de Ciénaga.

(2011) En el sector del Kilómetro 19 (KM-19), por la Gobernación del Magdalena no arrojaron los resultados esperados. Posteriormente, la Gobernación del Magdalena, contrato con SISCO INGENIERIA en el 2014-2015, los estudios y diseños de las obra de protección temporal y definitivas para la solución del Km-19, en un tramo de 4.0 km.

(2014) En el sector del Ciénaga, la Alcaldía del Municipio contrato con SISCO INGENIERIA el diseño de las obras de protección temporal del sector del Malecón en un tramo 1.0 km. El estudio incluyó información de detalle en cuanto a mediciones de campo, análisis de la dinámica marina y litoral, uso de modelo numérico para valorar el efecto de las obras propuesta en el largo plazo.

(2014) El INVEMAR en el evento de la Comisión Colombiana del Océano (Nov 2014), presentó para el sector de estudio los resultados de la tesis de Juan Felipe Gómez (2013), en la cual realiza un análisis de la evolución histórica de la barra de salamanca entre 1953 y 2013.

(2012 a la fecha) El INVEMAR realiza monitoreos periódicos de playas en sectores de la Isla de Salamanca con especial atención en el KM-19. Los perfiles no son completos (solo recogen la parte alta del perfil de playa), y no permiten realizar una buena evaluación del efecto de las dinámicas actuantes.

## 2. ANALISIS DE LA MORFODINAMICA DE LA BARRA A TRAVES DE LA DIAGNOSIS

La diagnosis como propuesta de método investigativo, permite comprender y entender de forma adecuada el comportamiento físico en estudio, a partir del conocimiento de las principales variables que intervienen y su influencia en la condición actual. El análisis de las variaciones de la línea de costa para el estudio morfodinámico pretende estudiar en primera medida las dinámicas actuantes que definen la costa como lo son: el oleaje, corrientes y transporte de sedimentos. Los modelos teóricos existentes en la ingeniería costera para la evolución de la línea de costa, tratan de integrar las dinámicas con el objetivo de conocer a que se debe este comportamiento.

Para la definición de la Diagnosis se aplicará el siguiente proceso metodológico:

- 1. Recopilación de información:** Inicialmente se realiza la búsqueda de información existente en diferentes entidades privadas o públicas, hacen parte documentos como artículos e investigaciones, relacionando aspectos como; estudios batimétricos, topográficos, imágenes de satélites, sedimentos, oleaje, vientos, geología y geomorfología, imágenes históricas, entre otras. La información fue analizada y procesada de acuerdo a cada uso del que fuese requerido en la investigación.
- 2. Descripción de la Zona de Estudio:** Se define la localización de la zona de estudio en la cual se realizará la Investigación, se presentan aspectos generales asociados al clima, y se comienza abordar sobre las características de la zona asociada a la geología y geomorfología, batimetría y perfiles.
- 3. Análisis de la evolución de la línea de costa:** En la zona de estudio, se analizarán aspectos de la formación histórica de la barra, identificación y determinación de cambios en la línea de costa con el objeto de definir; sitios de erosión y sedimentación. La metodología comprende el análisis de la información recopilada, la digitalización de líneas de costa a través de imágenes de satélites, que luego con el uso de software tipo CAD permitirán determinar a partir de líneas transversales a la costa, los principales cambios morfodinámicos en diferentes periodos de estudio.
- 4. Análisis del clima marítimo:** El clima marítimo influye en el comportamiento morfodinámico de la zona en estudio, se realizará un análisis detallado de este componente. Debido a que no existen boyas en la zona de interés, el estudio se realizará a través de información recopilada de fuentes de datos de obtenidos mediante el modelo Wavewatch de la NOAA. El oleaje en aguas profundas se caracterizará con la metodología de análisis estadístico correspondiente para definir los regímenes medio y extremal. Luego, se utilizará un modelo numérico



de propagación de oleaje, para llevarlos a los sitios de interés en la línea de costa en estudio. A lo largo de la línea de costa, se colocaran una serie de boyas virtuales, en donde se definirá para cada una con el modelo numérico, las características del oleaje en cuanto a su altura, dirección y periodo. Para esto se utilizará una interpolación bilineal. Los resultados permitirán valorar y entender el comportamiento del oleaje a medida que se aproxima a la costa debido a los procesos de refracción, difracción y asomeramiento influenciados por las condiciones batimétricas y morfométricas presentes en la zona de estudio. Estas dinámicas permitirán contar con la información base para el análisis de la dinámica litoral. Así mismo, se incluye información que tiene que ver con mareas y vientos.

5. **Análisis de la Dinámica Litoral:** La dinámica litoral es la responsable de la morfodinámica de la barra, depende del oleaje en su intensidad y dirección a medida que se aproxima a la costa. Se incluye en esta aparte las características típicas del sedimento existente en la zona de estudio, en lo que tiene que ver con tamaños o granulometría. El cálculo de las tasas de transporte de sedimentos, se realizará utilizando formulaciones conocidas como la de Kamphuis, Van Rijn y el CERC, así como su patrón direccional predominante. De esta manera, podremos observar como varia el transporte de sedimentos y su incidencia en la morfodinámica a lo largo de la costa. Se incluye en este apartado, lo que tiene que ver el análisis de perfiles representativos de la zona de estudio.
6. **Conclusiones de la Diagnósis:** Con base a los estudios presentados anteriormente, en este apartado, se presentan las conclusiones de la diagnosis de la morfodinámica de la barra en estudio, se hace una selección específica de los principales aspectos relevantes, y se presenta las principales causas de las dinámicas estudiadas en la barra.

## 2.1. GENERALIDADES DE LAS BARRAS

Las barras son un tipo de líneas de costa, formadas por acumulación de arenas no consolidadas, derivadas por lo general de zonas pertenecientes a deltas donde predominan una gran abundancia de sedimentos. Figura. 2-1

**Figura 2-1. Imagen de Barra-, Egg Island, Alaska (en el delta del río Copper).**



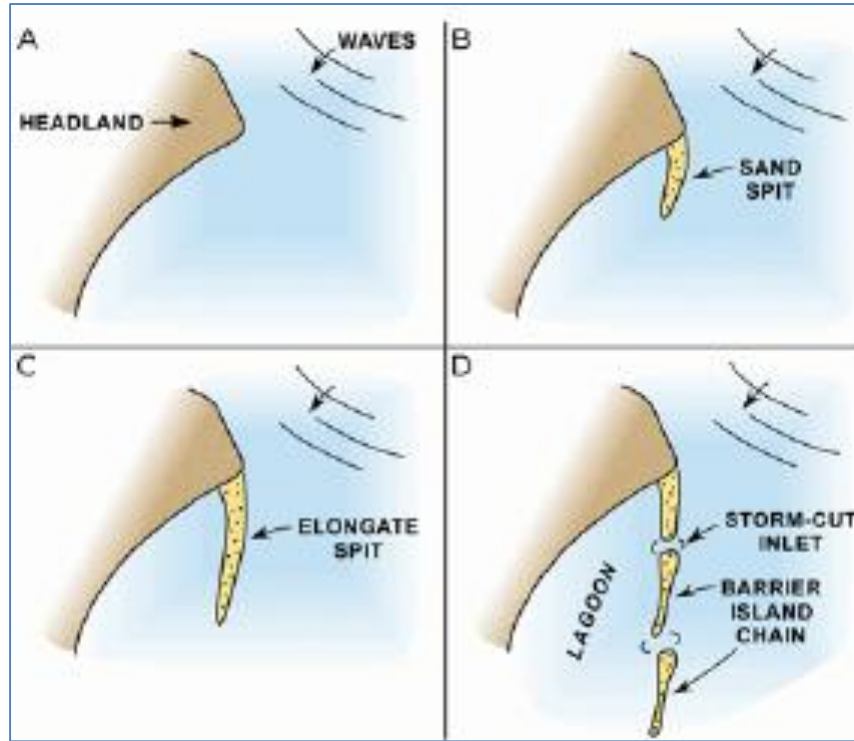
*Fuente: Encyclopedias of the Natural World: Encyclopedia of Islands.*

En la figura 2-2, se presentan un esquema ilustrativo, de la forma cómo genera una barra de arena en la costa. Los oleajes a medida que se acercan a la costa (A), que son los responsables de las corrientes que transportan los sedimentos, son afectados por la existencia de un punto duro (efecto de difracción), el cual produce una disminución de la velocidad de las corrientes, frenando el transporte de sedimentos. Este fenómeno comienza a evidenciar la generación de una espiga (B), a medida que sigue el proceso de oleaje – corrientes – transporte de sedimentos, continua con el alargamiento de la espiga (C), la cual empieza a migrar en la dirección del transporte dominante y la costa, hasta que en el tiempo puede llegar a unirse con la línea de costa continental.

Por efecto de los altos oleajes producido por temporales, se pueden romper en puntos específicos las barras, generándose “bocas” (D) que nuevamente se cierran debido a la dinámica típica asociada al transporte de sedimento.

Se observa que durante la creación de las barras, predomina un cordón litoral y una playa trasera (lagoo) de baja cota.

Figura 2-2. Ilustración de cómo se puede crear una barra



Fuente: *Encyclopedias of the Natural World: Encyclopedia of Islands.*

## 2.2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.2.1. LOCALIZACIÓN GENERAL.

La zona de estudio se localiza en la “Vía Parque Isla de Salamanca” entre Bocas de Cenizas y el Casco Urbano del Municipio de Pueblo Viejo, en una longitud de costa del orden de 60 km. Hace parte de la zona de estudio las siguientes infraestructuras: la vía (Ruta 90) que conduce de Barranquilla a Santa Marta, el trazado de la tubería denominado “Gasoducto Troncal Ballenas – Barranquilla – Cartagena” y el cable de fibra óptica.

Para una mejor comprensión en la presentación de los resultados de la investigación, hemos propuesto dividir la zona a partir de un punto de referencia de la vía (Km 19), este punto será definido con respecto a la línea de costa como Km 0+00, y abscisas crecientes hasta el Km 0+30 en dirección a Pueblo Viejo y decrecientes Km 0-30 hacia Bocas de Cenizas. Ver Figura 2-3. Localización general de la zona de estudio.

Figura 2-3. Localización general de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia mediante imágenes de Google Earth.

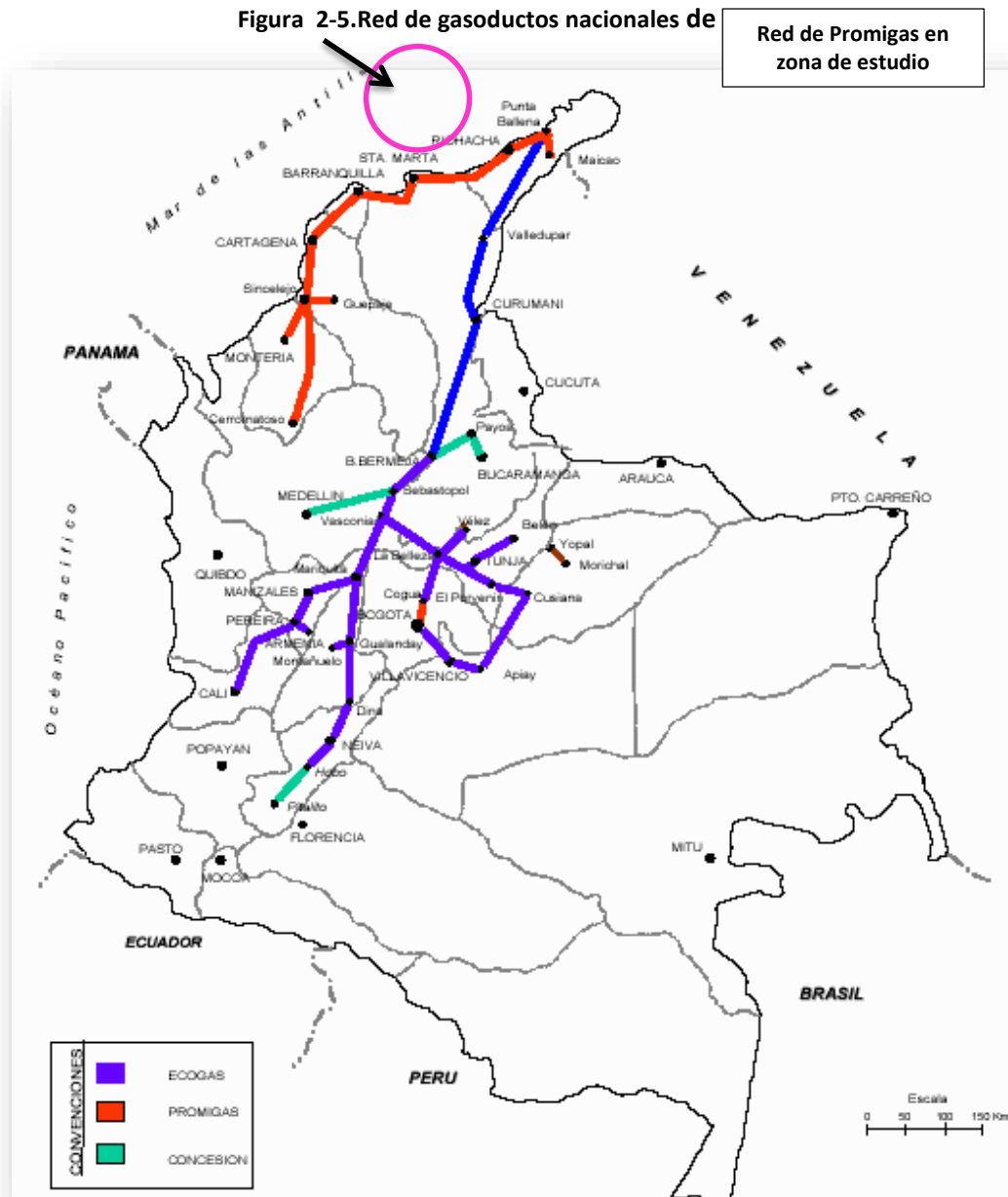
La Figura 2-4, muestra abscisas de referencia a cada 5 y 10 Km a partir del Km 0+00 en la línea de costa que conforma la zona de estudio a tal manera de contar, con sectores de ubicación al cual se hará referencia durante los análisis morfodinámicos de la barra.

Figura 2-4. Localización general de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia mediante imágenes de Google Earth.

La Figura 2-5, presenta la red de gasoducto regional de PROMIGAS con énfasis en el trazo que se localiza en la zona de estudio.



Fuente: PROMIGAS.

### 2.2.2. INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA.

El departamento del Magdalena presenta dos temporadas de lluvia, la primera en parte de abril y mayo; la segunda entre los meses de septiembre y noviembre; una temporada de menor intensidad de lluvias entre los meses de junio y agosto y por último una temporada seca entre los meses de diciembre y marzo.

#### 2.2.2.1. Temperatura.

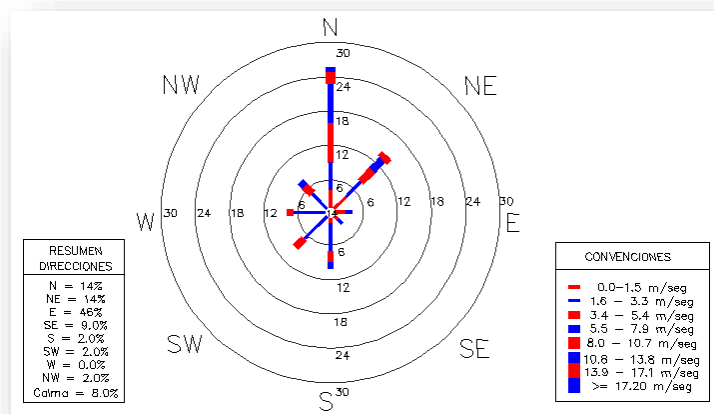
La temperatura en el sitio de proyecto corresponde al piso térmico cálido, con un promedio anual de 29°. La amplitud térmica anual típicamente no supera los 35° y los meses más calurosos corresponden a los meses de mediados de año. En el período de enero a abril, aunque corresponden a una estación seca, los vientos alisios constituyen un elemento moderador del clima, generando un decrecimiento de las medias mensuales de temperatura.

#### 2.2.2.2. Régimen de Vientos.

Los vientos dominantes en el sector corresponden a los vientos Alisios del noreste. Si bien, en mar abierto, ésta es la dirección predominante, la presencia de la Sierra Nevada de Santa Marta modifica el régimen direccional del viento en la zona continental.

La Figura 2-6, muestra la rosa de vientos para la ciudad de Santa Marta. En ella se observa que la dirección dominante del viento es la dirección Norte con una frecuencia del 26% del tiempo. Le sigue la dirección Noreste con un 15%.

**Figura 2-6. Rosa de vientos para la ciudad de Santa Marta.**



Fuente: IDEAM

### **2.2.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.**

La información que se presenta a continuación ha sido tomada en su mayoría de los estudios realizados por el INVEMAR, entidad la cual presenta un importante número de investigaciones en la zona de estudio y la tiene ampliamente caracterizada.

#### **2.2.3.1. Contexto Geológico.**

Tomado de “Monitoreo de la Playa entre el kilómetro 19 y 20 de la vía Barranquilla (Atlántico) – Ciénaga (Magdalena)”.

*“El sector del área de estudio comprende una costa baja, constituida por los depósitos deltaicos recientes del río Magdalena. El delta antiguo del río Magdalena pertenece a la amplia cuenca del valle inferior del Magdalena. Raasveldt, y Tomic (1958) lo describen como una depresión natural de edad Holoceno, limitada al oeste y sur por unidades de rocas Terciarias y Pleistocenas. Estas últimas, son topográficamente más altas y determinan el límite de los procesos de erosión y sedimentación más recientes del Holoceno. Al oriente está delimitada por las formaciones rocosas, más antiguas, de la Sierra Nevada de Santa Marta.*

*La llanura deltaica del río Magdalena es una amplia zona baja y cenagosa, con numerosas lagunas, canos, orillares, cauces abandonados del río y bosques de manglar. La llanura deltaica es antecedida por barras litorales, entre las que destaca, la barra de Salamanca, la cual, separa la Ciénaga Grande de Santa Marta, del Mar Caribe, en un tramo de 27 Km de longitud. Su amplitud mínima es de 300 m, al oriente de la ciénaga cuatro bocas, y máxima de 1.7 Km, en cercanías de la población de isla rosario. los puntos más altos de la barra no superan los 5 m de altura.*

*La plataforma continental de esta zona recibió en el pasado un importante aporte de sedimentos terrígenos provenientes del río Magdalena, durante la construcción activa de lóbulos deltaicos. Según se desprende del mapa de facies sedimentarias, realizado por el CIOH (1993), en la plataforma se extiende una faja de arenas terrígenas adyacente a la costa. Ésta se amplía frente a la ciénaga grande y ciénaga piedras, donde representa la expresión submarina de dos antiguos lóbulos deltaicos del río Magdalena (Von Erffa, 1973).*

#### **DEPÓSITOS CUATERNARIOS**

*Se presentan tres tipos de depósitos relacionados con los procesos de formación sedimentaria en la zona Se presentan tres tipos de depósitos relacionados con los procesos de formación sedimentaria en la zona:*

**Depósitos de playa.**

*Depósitos de color gris oscuro, formados por arenas de playa de grano fino, compuestas por cuarzo, minerales pesados. Presentan estratificación plana paralela a semiparalela continua, se observan pequeños lentes de material carbonatado y algunos de un material blanco, arcilloso. A lo largo de la línea de costa de la carretera Santa Marta Barranquilla, las playas presentan abundantes conchillas (INGEOMINAS, 2001).*

**Depósitos eólicos.**

*Son un tipo de depósito arenoso fino acumulados por el viento y cuyo material proviene de las playas y cordones litorales existentes. Su orientación está condicionada a la del viento, que para el caso de la barra de Salamanca, proviene el 80% del tiempo del NE (Von Erffa, 1973).*

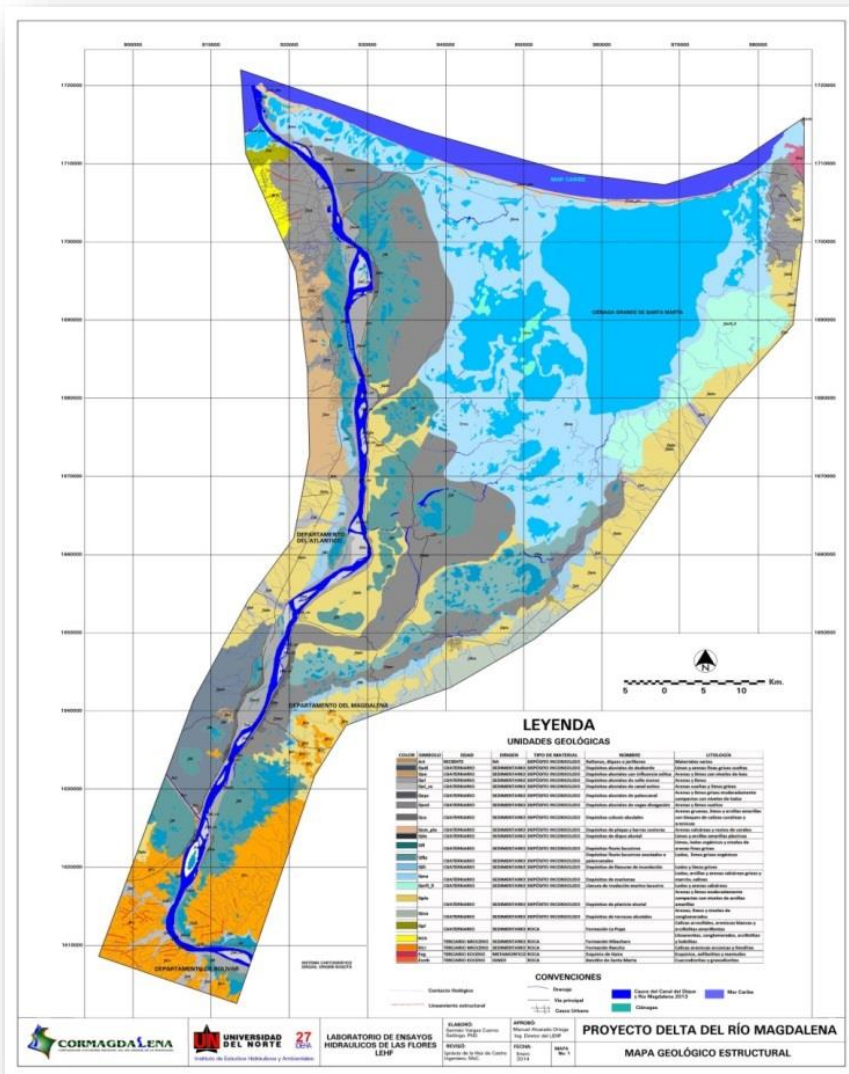
**Depósitos lacustres.**

*Depósitos lacustres Depósitos formados con sedimentos finos, asociados a pantanos, caracterizados por la presencia de vegetación principalmente manglares”.*

La Universidad del Norte, para CORMAGDALENA en el año 2014, realizó el mapa Geológico del delta del río Magdalena, en donde se caracteriza la zona de estudio. Ver Figura 2-7



Figura 2-7. Mapa geológico de la zona de estudio.



Fuente: G. Vargas UNINORTE 2014.

**Figura 2-8. Unidades Geológicas representadas en el mapa Geológico.**

COLOR	SÍMBOLO	EDAD	ORIGEN	TIPO DE MATERIAL	NOMBRE	LITOLOGÍA
	Art	RECIENTE	NA	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Rellenos, diques o jarillones	Materiales varios
	Qadi	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos aluviales de desborde	Limos y arenas finas grises sueltas
	Qae	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos aluviales con influencia eólica	Arenas y limos con niveles de loes
	Qal	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos aluviales de valle menor	Arenas y limos
	Qal_ca	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos aluviales de canal activo	Arenas sueltas y limos grises
	Qapc	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos aluviales de paleocanal	Arenas y limos grises moderadamente compactos con niveles de lodos
	Qavd	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos aluviales de vegas divagación	Arenas y limos sueltos
	Qca	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos coluvio aluviales	Arenas gruesas, limos y arcillas amarillas con bloques de calizas coralinas y areniscas
	Qcm_pla	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos de playas y barras costeras	Arenas calcáreas y restos de corales
	Qda	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos de dique aluvial	Limos y arcillas amarillas plásticas
	Qfi	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos fluvio lacustres	Limos, lodos orgánicos y niveles de arenas finas grises
	Qflp	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos fluvio lacustres asociados a paleocanales	Lodos, limos grises orgánicos
	Qlli	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos de llanuras de inundación	Lodos y limos grises
	Qma	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos de marismas	Lodos, arcillas y arenas calcáreas grises y marrón, salinas
	Qmfi_ll	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Llanura de inundación marino lacustre	Lodos y arenas calcáreas
	Qpla	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos de planicie aluvial	Arenas y limos moderadamente compactos con niveles de arcillas amarillas
	Qtza	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	DEPÓSITO INCONSOLIDO	Depósitos de terrazas aluviales	Arenas, limos y niveles de conglomerados
	Qpl	CUATERNARIO	SEDIMENTARIO	ROCA	Formación La Popa	Calizas arrecifales, areniscas blancas y arcillolitas amarillentas
	N1h	TERCIARIO MIOCENO	SEDIMENTARIO	ROCA	Formación Hibachero	Litoarenitas, conglomerados, arcillolitas y lodolitas
	N1r	TERCIARIO MIOCENO	SEDIMENTARIO	ROCA	Formación Rancho	Calizas areniscas arcóscas y limolitas
	Eeg	TERCIARIO EOCENO	METAMORFICO	ROCA	Esquisto de Gaira	Esquistos, anfíbolitas y mármoles
	Esmb	TERCIARIO EOCENO	IGNEO	ROCA	Batolito de Santa Marta	Cuarzodioritas y granodioritas

Fuente: G. Vargas UNINORTE

### 2.2.3.2. Unidades y Rasgos Geomorfológicos.

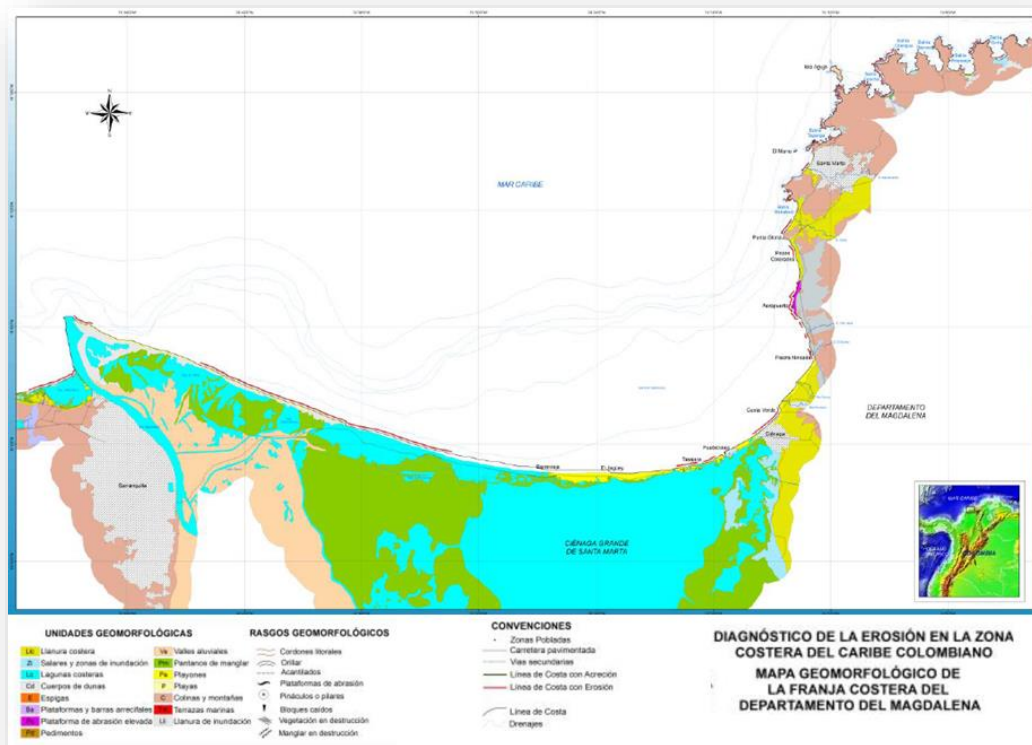
Tomado de “Monitoreo de la playa entre el kilómetro 19 y 20 de la vía Barranquilla (Atlántico) – Ciénaga (Magdalena)”.

*“La barra de Salamanca es una barra arenosa que se formó a partir de la unión de una cadena de pequeñas islas barrera, durante el divagar durante el Holoceno del río Magdalena, entre su desembocadura en el extremo oriental de la actual ciénaga hasta su curso actual. Inicialmente constituía una isla como tal, limitada al sur por el cauce Viejo del Magdalena y al norte por el mar Caribe, pero a raíz de las obras de encauzamiento del río por Bocas de Ceniza, el extremo oeste, en los predios que se conocían como la isla de los Gómez, quedó unido a tierra (Wiedemann, 1973; Von Erffa, 1973, Bernal, 1995).”*

*La evolución de este tipo de geoformas se produce por la progradación hacia tierra de los cordones litorales y dunas producto de la deriva litoral, el oleaje y el viento. Por esta razón, son las geoformas menores encontradas en los perfiles transversales, la mayor parte de las veces separadas entre sí por depresiones someras que correspondían a lagunas costeras y que ahora son playones salinos inundables y pantanos de manglar.*

*Como geoforma general, la barra de Salamanca se caracteriza por una forma semicircular suave o de bahía amplia en el lado hacia el mar, mientras que hacia la CGSM tiene forma de lóbulos, limitados por las antiguas bocas de la Ciénaga, muy evidentes como en el caso de el Rincón del Jagüey, el de Barra Vieja y el de Aguas Vivas, y menos evidentes en los sectores de cano Caimán y entre isla del Rosario y Tasajera. Sobre la barra de Salamanca se extiende la vía nacional Ciénaga-Barranquilla, construida sobre un terraplén de 2 m de alto en promedio y cuyos flancos son muy empinados hacia los playones adyacentes; están casi completamente cubiertos por vegetación de rastrojos altos, cactus y arbustos y en sus bases siempre hay una gran acumulación de conchas”. Ver Figura 2-9*

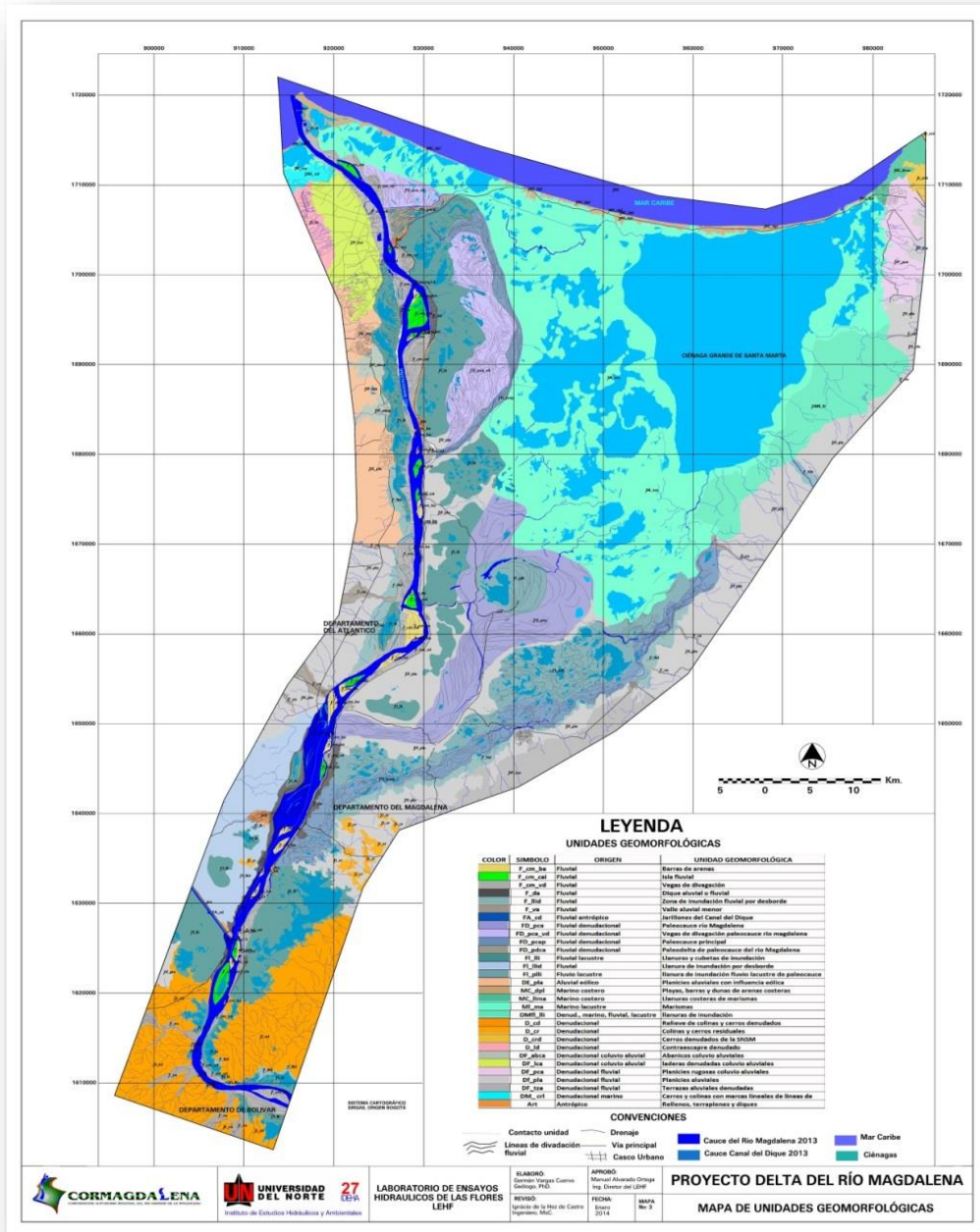
**Figura 2-9, Mapa Geomorfológico de la franja costera del departamento del Magdalena.**



Fuente: INVEMAR 2014.

La Universidad del Norte, para CORMAGDALENA en el año 2014, realizó el mapa Geomorfológico del delta del río Magdalena, en donde se caracteriza la zona de estudio. Ver Figura 2-10 y Tabla 2-1. Unidades Geomorfológicas representadas en el mapa Geológico. G. Vargas. UNINORTE.

Figura 2-10. Mapa geomorfológico de la Zona de Estudio.



Fuente: G. Vargas UNINORTE 2014.

**Tabla 2-1. Unidades Geomorfológicas representadas en el mapa Geológico. G. Vargas. UNINORTE.**

COLOR	SÍMBOLO	ORIGEN	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA
	F_cm_ba	Fluvial	Barras de arenas
	F_cm_cai	Fluvial	Isla fluvial
	F_cm_vd	Fluvial	Vegas de divagación
	F_da	Fluvial	Dique aluvial o fluvial
	F_llid	Fluvial	Zona de inundación fluvial por desborde
	F_va	Fluvial	Valle aluvial menor
	FA_cd	Fluvial antrópico	Jarillones del Canal del Dique
	FD_pca	Fluvial denudacional	Paleocauce río Magdalena
	FD_pca_vd	Fluvial denudacional	Vegas de divagación paleocauce río magdalena
	FD_pcap	Fluvial denudacional	Paleocauce principal
	FD_pdca	Fluvial denudacional	Paleodelta de paleocauce del río Magdalena
	FI_lli	Fluvial lacustre	Llanuras y cubetas de inundación
	FI_llid	Fluvial	Llanura de inundación por desborde
	FI_plli	Fluvio lacustre	Llanura de inundación fluvio lacustre de paleocauce
	DE_pla	Aluvial eólico	Planicies aluviales con influencia eólica
	MC_dpl	Marino costero	Playas, barras y dunas de arenas costeras
	MC_llma	Marino costero	Llanuras costeras de marismas
	MI_ma	Marino lacustre	Marismas
	DMfl_lli	Denud., marino, fluvial, lacustre	Llanuras de inundación
	D_cd	Denudacional	Relieve de colinas y cerros denudados
	D_cr	Denudacional	Colinas y cerros residuales
	D_crd	Denudacional	Cerros denudados de la SNSM
	D_id	Denudacional	Contraescapre denudado
	DF_abca	Denudacional coluvio aluvial	Abanicos coluvio aluviales
	DF_lca	Denudacional coluvio aluvial	laderas denudadas coluvio aluviales
	DF_pca	Denudacional fluvial	Planicies rugosas coluvio aluviales
	Df_pla	Denudacional fluvial	Planicies aluviales
	DF_tza	Denudacional fluvial	Terrazas aluviales denudadas
	DM_crl	Denudacional marino	Cerros y colinas con marcas lineales de líneas de
	Art	Antrópico	Rellenos, terraplenes y diques

De la tesis de grado de Dalmiro Gámez “Caracterización geomorfológica y de procesos erosivos del cordón de dunas entre los Km 26 y 28 del vía parque isla de salamanca-vipis, departamento del Magdalena”, se tomó las características generales de la playa y perfiles, que presentan condiciones similares a las existente en el KM-19.

*“Las playas se definen como zona de material no consolidado que se extiende hacia tierra desde la línea de la más baja marea hasta el lugar donde se presenta un marcado cambio en el material, forma fisiográfica o hasta donde se inicie la línea de vegetación permanente, usualmente límite efectivo de las olas de temporal (Decreto 2324, 1984 en Gómez y Carvajal, 2011).”*

*En general las playas en el área de estudio son rectilíneas con un promedio de frente de playa entre 7° y 9°, compuestas por arenas de color gris y amarillo de tamaño*

*medio con contenido de cuarzo, feldespatos, plagioclasas, minerales pesados en diferentes porcentajes y con presencia de bioclastos concentrados en las cúspides de playa. Sin embargo, características como tamaño, presencia de cúspides (Beach-Cusp), escarpes de playa, bermas pueden variar dependiendo de periodo de lluvias o seco.*

*Pueden presentarse varios niveles de bermas con espesores entre 0.10 y 0.7 m, en donde se observa la estratificación plano paralela resultado de la depositación de sedimentos claros y oscuros (minerales pesados).*

#### **1.1.1. Planos de Inundación (bajos de inundación, Cubetas de derrame, Swale).**

*Son depresiones suaves y poco profundas, ubicadas a nivel del mar o por debajo del mismo y que sufren inundaciones periódicas (encharcamiento) o permanentes, como consecuencia de altas precipitaciones o alto nivel freático. Los suelos en estas depresiones están compuestos por sedimentos finos no consolidados (arcillas, limos) (Gómez y Carvajal, 2011). Además estos sectores pueden presentar acumulación de minerales evaporíticos y grietas de desecación. Estas pueden estar vegetadas por pastos y encontrarse en la parte trasera de la playa y de la duna incipientes, o en otras ocasiones se puede encontrar en otros sectores con presencia de agua (meteórica y/o marina) y grietas de desecación; además pueden presentar restos de materia orgánica y delgadas costras de sal cubriendo el lodo.*

#### **1.1.2. Pantano intermareal.**

*Son superficies de extensiones muy variables, conformadas esencialmente por lodos, con abundante materia orgánica, y ubicadas principalmente en los bordes de las grandes lagunas costeras y ciénagas menores (Posada y Segura, 2002), lo que genera condiciones propicias para el crecimiento de vegetación pionera como manglar y otras especies halófitas. Estos sectores sufren inundaciones periódicas por oleajes extremos, mareas, la combinación de ambos (wave setup) o por desborde de ríos o lagunas costeras. (Gómez y Carvajal, 2011).*

*Esta es la unidad más frecuente y amplia, y la que más ha sufrido alteración antrópica, lo cual ha generado subdivisiones internas. Dentro de estas se encuentran zonas con manglar muerto pantanosas e inundables, zonas con mangle vivo; estas subdivisiones se comunican entre sí en algunos sectores por pequeños caños de agua.*

*Las zonas con manglar muerto pantanoso e inundable, generalmente son de color rojizo, se formaron por efecto de la intervención antrópica cuando se construyó la vía Ciénaga-Barranquilla, estas son áreas cercanas a la costa y presentan espejos de agua. El sedimento es lodoso de color gris con presencia de grietas de desecación y restos de materia orgánica.*

*Las zonas de mangle vivo se encuentran en su gran mayoría en la franja sur de la vía que de Ciénaga conduce a Barranquilla ya que en esta área es donde tienen más contacto con agua salobre que viene de la Ciénaga Grande de Santa Marta, y está menos expuesta a la erosión del mar.*

### **1.1.3. Dunas.**

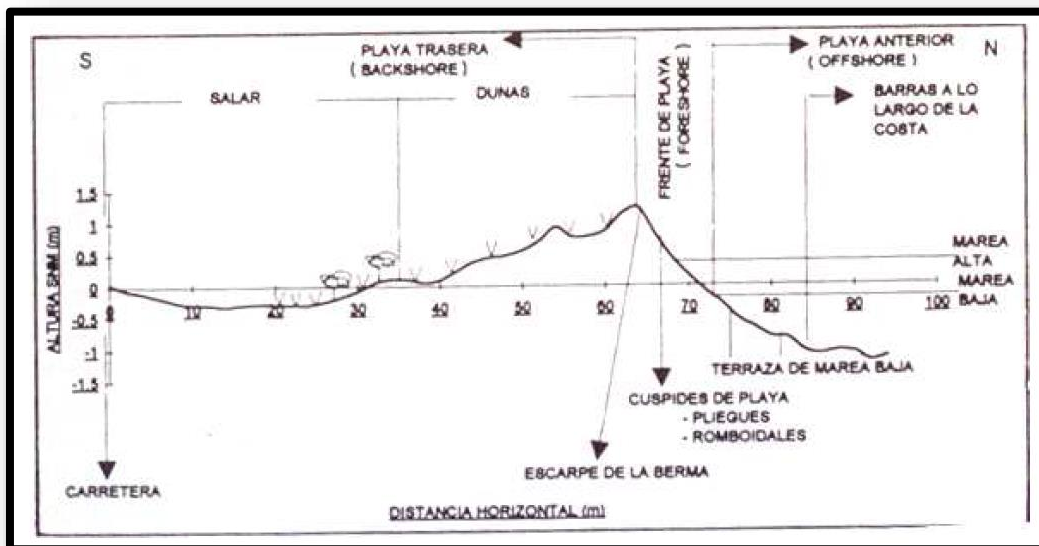
*Las dunas son formas de acumulación de arenas en los desiertos o en los litorales, posibilitadas por la disponibilidad de arena, viento capaz de movilizarla, un espacio adecuado donde pueda acumularse, vegetación que le permita fijarse y, para el caso del ambiente litoral, las olas juegan un papel importante en este proceso, ya que aportan la arena necesaria para generar las playas que con el tiempo darán inicio al proceso de la formación de las dunas costera. (Martín, 2004).*

*Las dunas costeras son el resultado de la interacción entre el viento y las superficies arenosas de la playa, las cuales juegan un papel determinante en la morfología del campo dunar. Estas interacciones entre el viento y la rugosidad de la playa se ven reguladas por la vegetación y el propio crecimiento de la duna”.*

La caracterización geomorfológica de la barra de Salamanca, realizada por Bernal (1995), representa los perfiles característicos identifica las lagunas costeras o salares (llanuras inundables), y la playa trasera con el cordón de dunas redondeadas. Rasgos como escarpes de playa y cúspides son frecuentes de observar en el frente de playa. Por debajo del nivel de marea baja se identificaron de igual manera las barras a lo largo de la costa. Ver Figura 2-11.



Figura 2-11. Perfil Esquemático de la Barra de Salamanca



Fuente: (Bernal 1995).

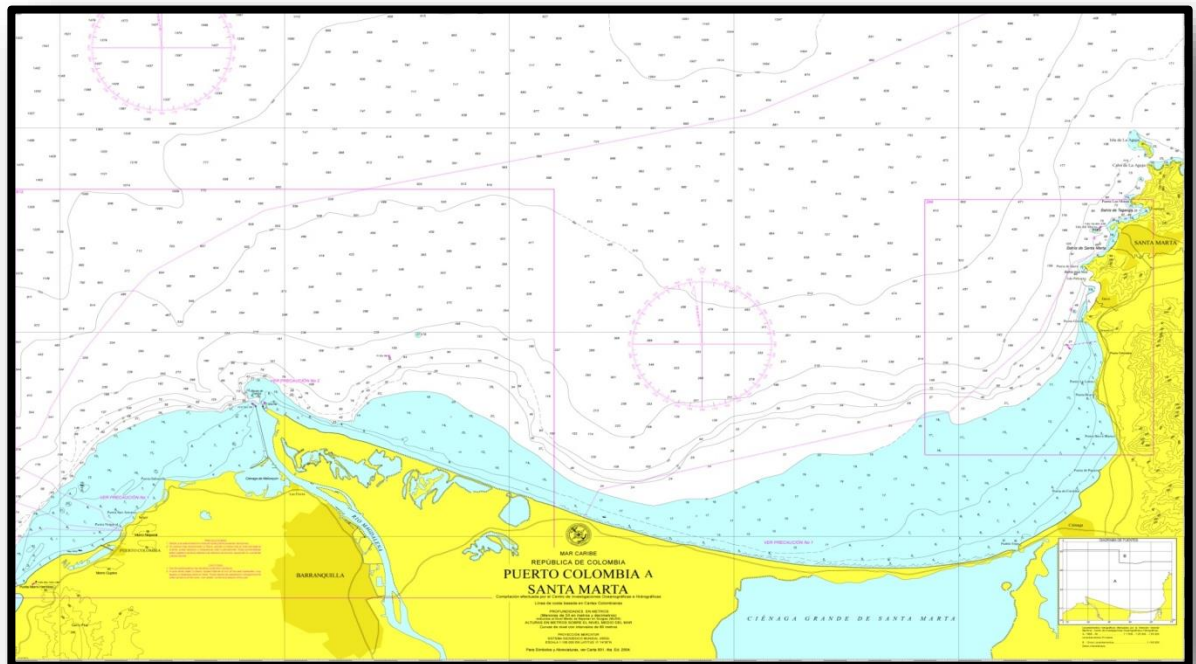
#### 2.2.4. CARACTERISTICAS BATIMETRICAS.

La carta náutica de la DIMAR muestra la batimetría en detalle que predomina en la zona de estudio. La isobata de 20 m (polígono de color azul) referencia las zonas de baja profundidad que hacen parte de los antiguos brazos que conformaron el delta del río Magdalena, información que se mostrará en detalle en el siguiente capítulo de evolución de la línea de costa.

En términos generales la morfología del fondo marino muestra la presencia del cañón submarino frente a la zona de estudio con isobatas que siguen una dirección irregular. Para el caso de la isobata de 1000 m, se ubica a 70 km de la costa. Las isobatas de 500, 200, 100 y 50 m, muestran una tendencia paralela entre si y sigue la morfología que fue labrada por efectos de las antiguas bocas del río Magdalena.

La zona somera con profundidades de hasta 20 m, la isobata se aleja entre 10 y 5 Km en los tramos más anchos, mientras que hasta 2.0 Km el tramo más angosto que corresponde al sector del KM-19 de la ruta 90. Ver Figura 2-12.



**Figura 2-12. Batimetría de la zona de estudio (Carta náutica COL 407).**

*Fuente: Dimar*

Así mismo, se cuenta con información batimétrica y topográfica de estudios recopilados para el KM-19, KM-55 y Costa Verde en Ciénaga. Esta información nos ayudará para entender la dinámica de los perfiles que será estudiada más adelante.

## **2.3. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA EN LA BARRA DE SALAMANCA**

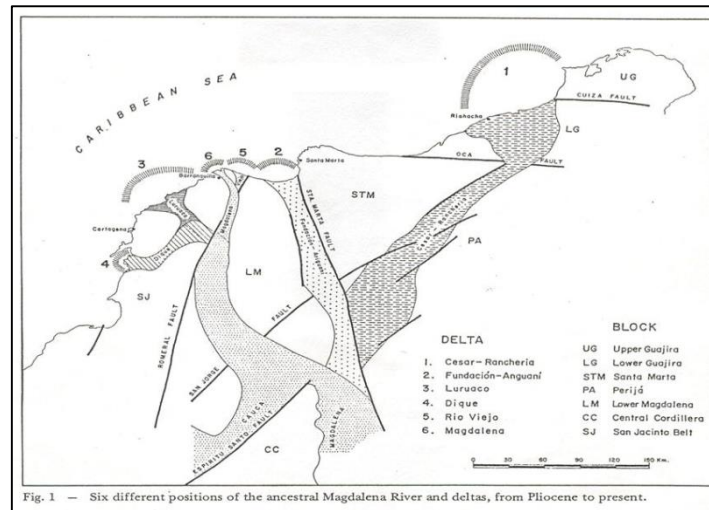
### **2.3.1. ASPECTOS HISTÓRICOS.**

La zona de la Isla Barra de Salamanca hace parte del DELTA reciente del río Magdalena, una representación de la evolución del delta del río Magdalena fue realizada por F. Cediél, D. Barrero y R. Llinás en el X Congreso de Geología del Caribe en 1983, desde el pleistoceno el río Magdalena ha presentado las siguientes desembocaduras, los cuales muestran el escenario general de su evolución en los últimos 5 millones de años: (Ver Figura 2-13).

1. Guajira, siguiendo el cauce de los hoy ríos Ranchería y Cesar.
2. Ciénaga, bordeando el flanco Oeste de la Sierra Nevada de Santa Marta.
3. Galerazamba, por el cauce de las hoy ciénagas del Totumo, Tocagua, Luruaco y embalse del Guájaro.

4. Bahía de Barbacoas – ciénaga La Matuna, siguiendo el hoy cauce del Canal del Dique.
5. Barranquilla (Río Viejo).
6. Barranquilla.

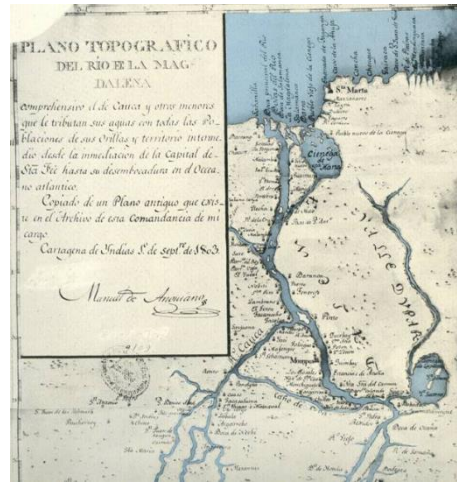
**Figura 2-13. Mapa de las diferentes posiciones que ha tenido la desembocadura del río Magdalena desde el Pleistoceno**



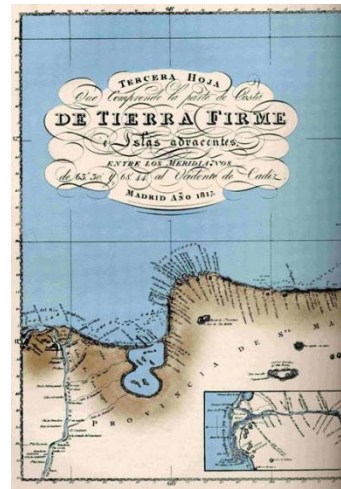
*Fuente: Llinás et. al. 1983. Libro Río Magdalena – Uninorte (2010).*

La cartografía histórica de Caldas (1813), Fidalgo (1817), y Tono (1817), se observa el estado de la zona de estudio en la Isla Barra de Salamanca, en donde se observa la línea de costa que depende de los caudales y fuentes de sedimentos del río Magdalena. Para el caso de Bocas de Ceniza el río se separaba en dos brazos, por la isla de Los Gómez: El Río Viejo al Este y el brazo principal con orientación hacia el Oeste debido a las corrientes marinas y a los vientos Alisios dominantes del Noreste. Ver Figura 2-14

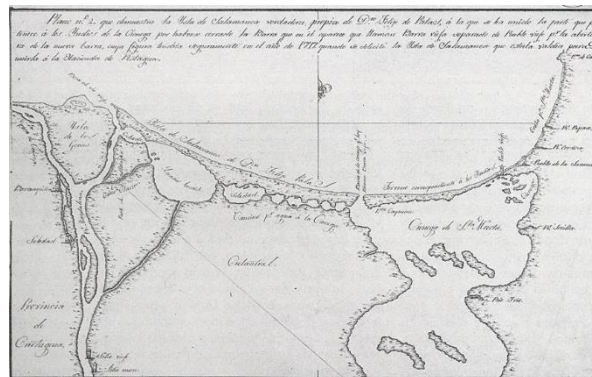
**Figura 2-14.** Cartografía antigua del río Magdalena mostrando su evolución para el período 1803 – 1817.



Caldas 1813



Fidalgo 1817



Tono 1817

Fuente.: Libro Río Magdalena – Uninorte (2010).

La carta del departamento del Magdalena de 1827 (Darmet), muestra la zona de estudio en su formación hacia la costa que tenemos hoy en día, se observa la forma de la Ciénaga Grande de Santa Marta y que la línea de costa presentaba una gran bocana que conectaba el mar con la ciénaga.

**Figura 2-15. Carta del departamento de la Magdalena. Grabado en París por Darmet, 1827.**



*Fuente: Libro Río Magdalena – Uninorte.*

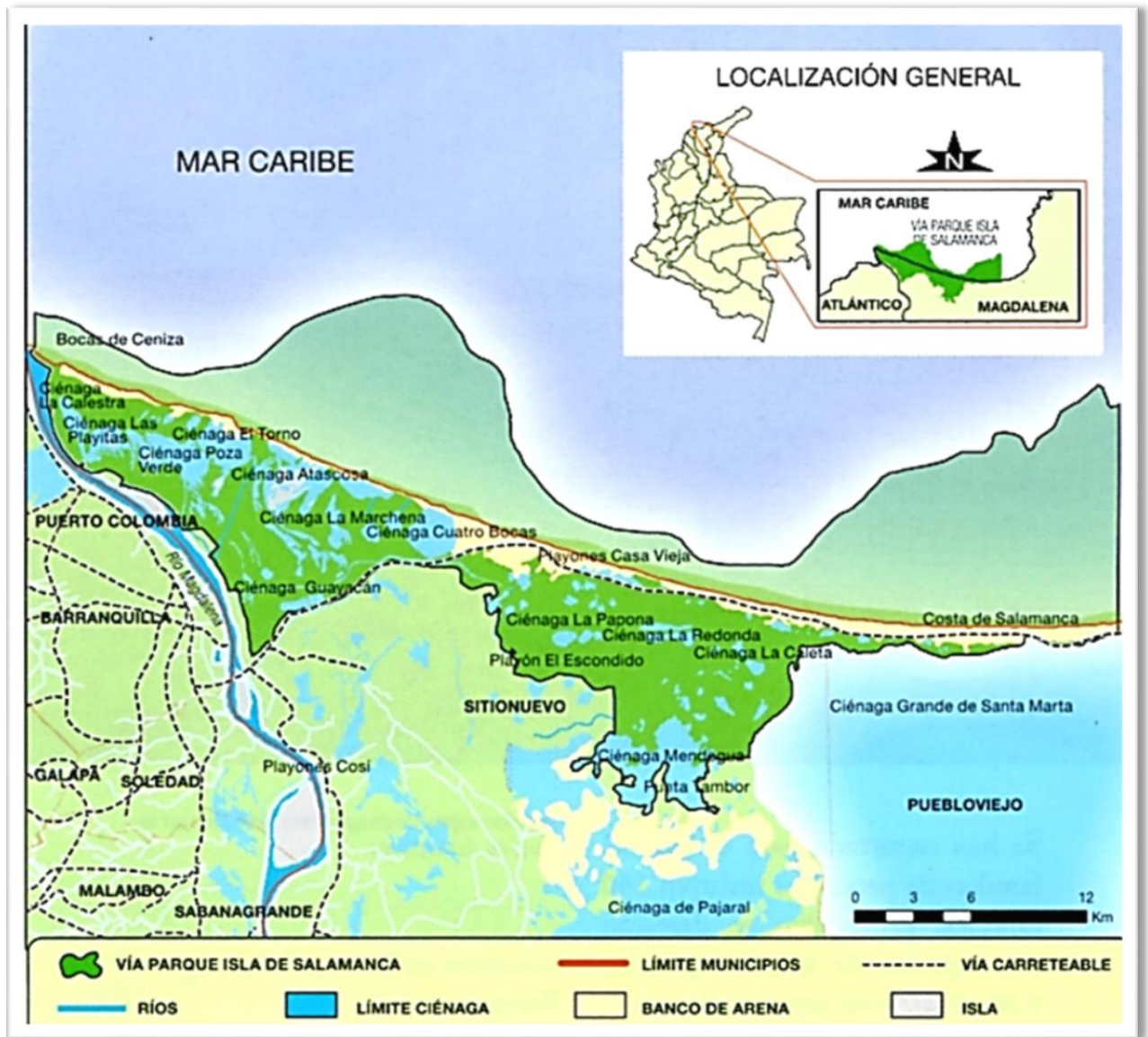
### 2.3.2. CONFORMACIÓN DEL PARQUE E INFRAESTRUTURA ACTUAL.

Por la importancia ecológica de la zona, el Gobierno nacional declaró como Vía Parque Isla de Salamanca la zona costera entre Barranquilla a Santa Marta, por donde se incluye el trazado de la vía que une a estas poblaciones. Ver Figura 2-16

El sistema está compuesto por playones y bosques de Manglar, en 1977 se declaró como santuario de Flora y Fauna a la Ciénaga Grande de Santa Marta y fue reconocido como el primer sitio Ramsar del país, posteriormente fue declarada Reserva de la Biosfera (Aguilera, 2011). Ver Figura 2-17

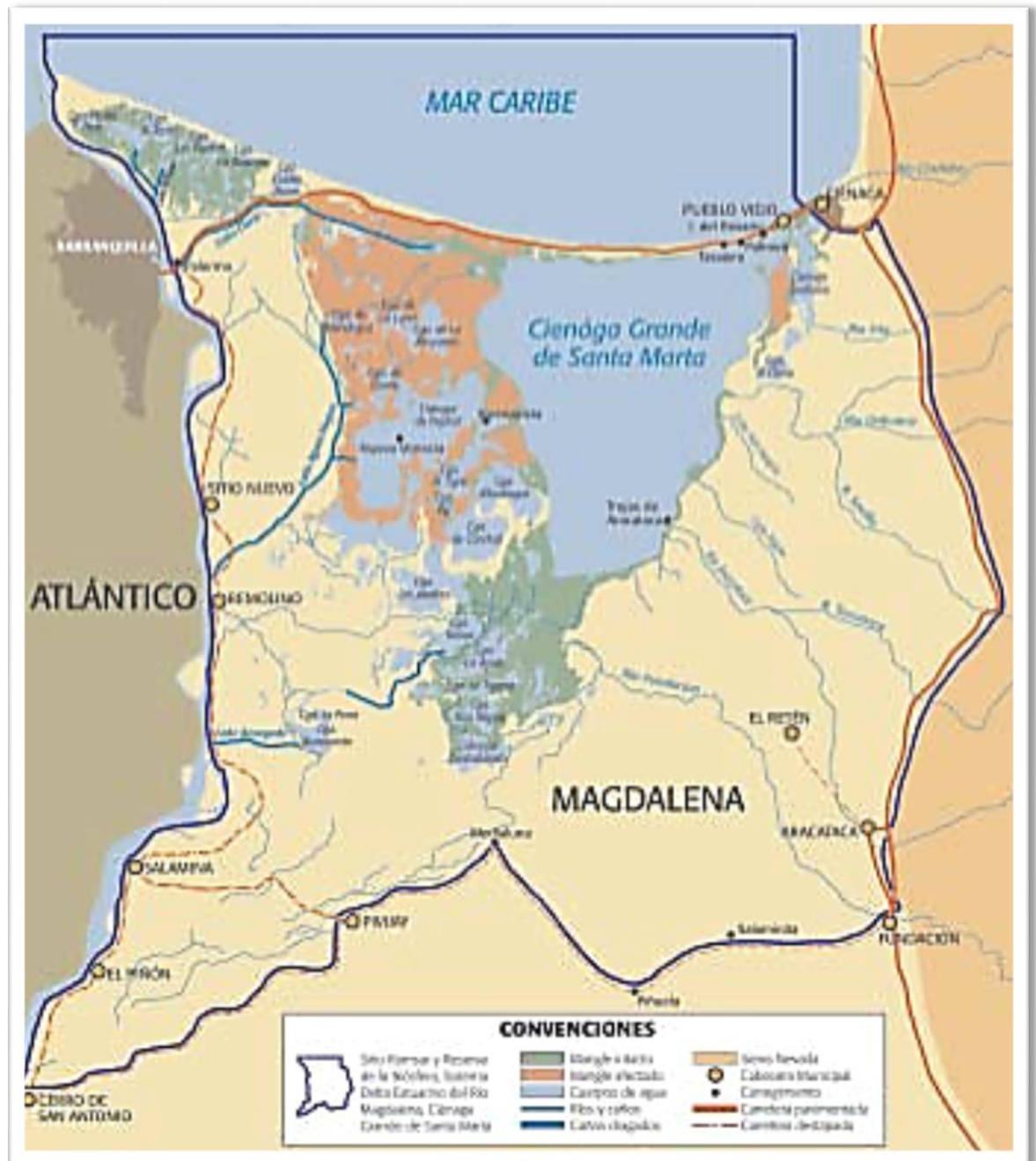


Figura 2-16. Límite Vía Parque Isla de Salamanca.



Fuente: Parques Nacionales

Figura 2-17. Zona Ramsar.



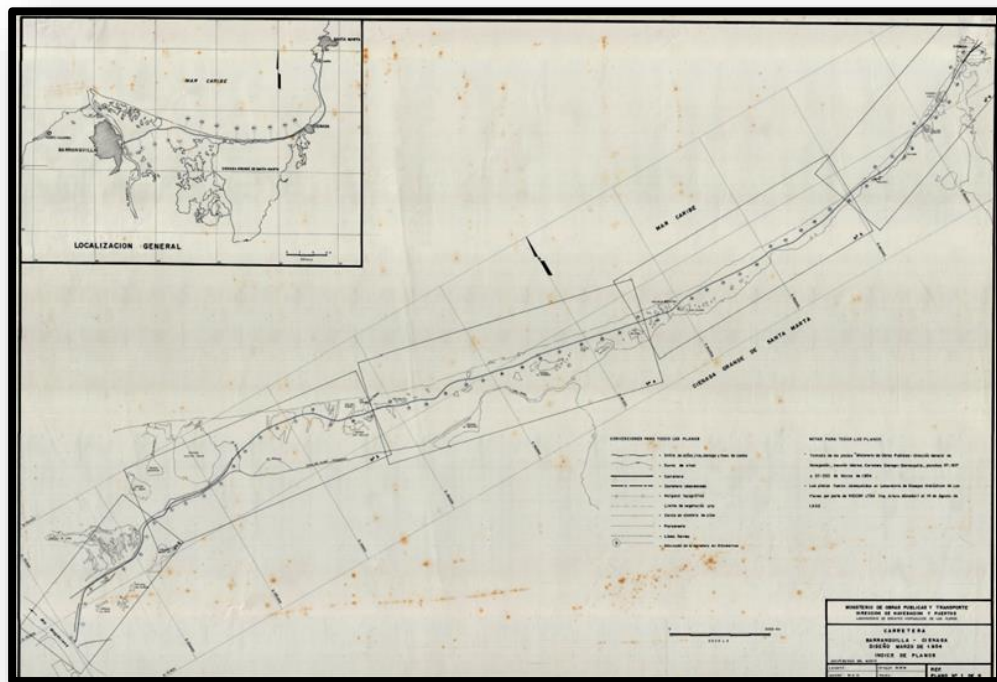
Fuente: Parques Nacionales.

El registro que se tiene de la construcción de la vía hoy Ruta 90, corresponde entre los años 1956 y 1960. Se desconoce cómo fue trazado el eje de la vía, pero se aprecia en los registros que fue definida evitando el cruce por los sistemas lagunares que comprende la Isla de Salamanca. Ver Figura 2-18

Por efecto de la construcción de la vía a través de un terraplén que no consideró suficientes pasos de agua, se produjo un incremento en la salinidad afectando la cobertura de Manglar, posteriormente procesos de recuperación realizados por organismos gubernamentales y nacionales, lograron recuperar parte de las zonas perdidas.

Precisamente el sector del actual KM-19, el alineamiento de la vía fue definida desde 3.0 Km atrás (hacia Barranquilla) por el paso de dos sistemas lagunares. El punto hoy en erosión del sector de KM-19, estaba ubicado sobre una laguna costera y se encontraba alejado de la línea de costa de 1954 a más de 500 m.

**Figura 2-18. Trazado vía Barranquilla – Santa Marta.**



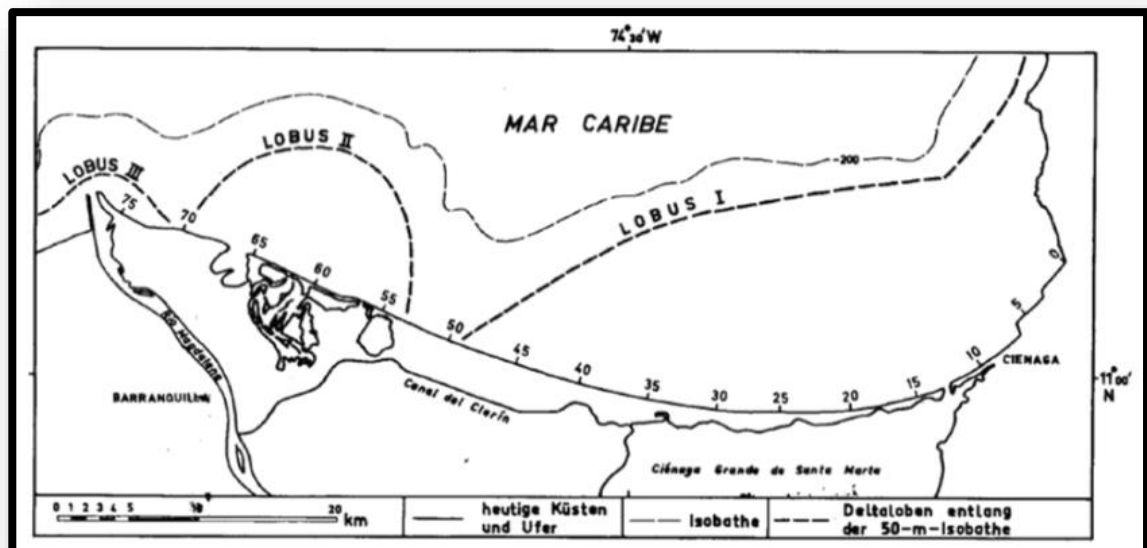
*Fuente: Digitalizado por Uninorte, Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores (1998).*

### 2.3.3. PRINCIPALES CAMBIOS DE LA LÍNEA DE COSTA EN LA ISLA BARRA DE SALAMANCA.

#### 2.3.3.1. Evolución de la evolución de la Isla de Salamanca (Desde 1900 a 1940).

Como se presentó en el apartado anterior, la barra de Salamanca tuvo su génesis por pertenecer al delta reciente del río Magdalena en su migración a la desembocadura actual en Bocas de Cenizas. En la costa predomina una serie de lóbulos que corresponde a las antiguas bocas del río Magdalena, cuando estuvo en este sector. El más reciente de todos es el lóbulo III, frente a la desembocadura actual río Magdalena, (Bocas de Ceniza). El lóbulo II, representa al delta submarino de una desembocadura del río Magdalena, hasta los años 20's. Se puede reconstruir el curso antiguo de este brazo de desembocadura, el "Río Viejo", por la configuración de los canales en el manglar detrás de la costa. El lóbulo I, que tiene el mayor de los radios con unos 35 Km, hace parte de un antiguo delta I del río Magdalena. Ver Figura 2-19.

Figura 2-19. Presencia de Lóbulos en el sector de la Isla de Salamanca.

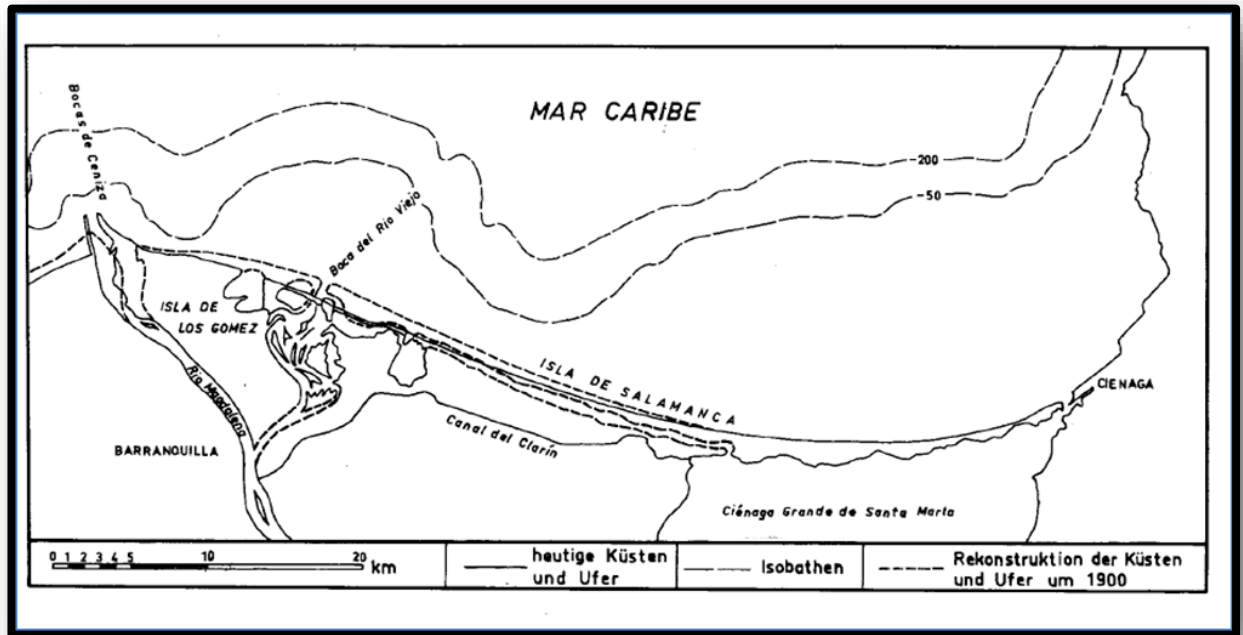


Fuente: Von Erffa (1973).



Von Erffa (1973), realizó a partir de la información disponible la evolución histórica de la costa en la Isla de Salamanca, en donde se aprecia que siempre ha sido una barra dinámica influenciada por el clima marítimo y los aporte de sedimento por parte de las Bocas del Río Magdalena. La Figura 2-20, muestra la evolución de las antiguas Bocas del río Magdalena, sobre todo en la que es conocida como “Boca de río Viejo” en la Isla los Gómez, se evidencia los cambios de esta fecha de la costa por causa de su dinámica natural.

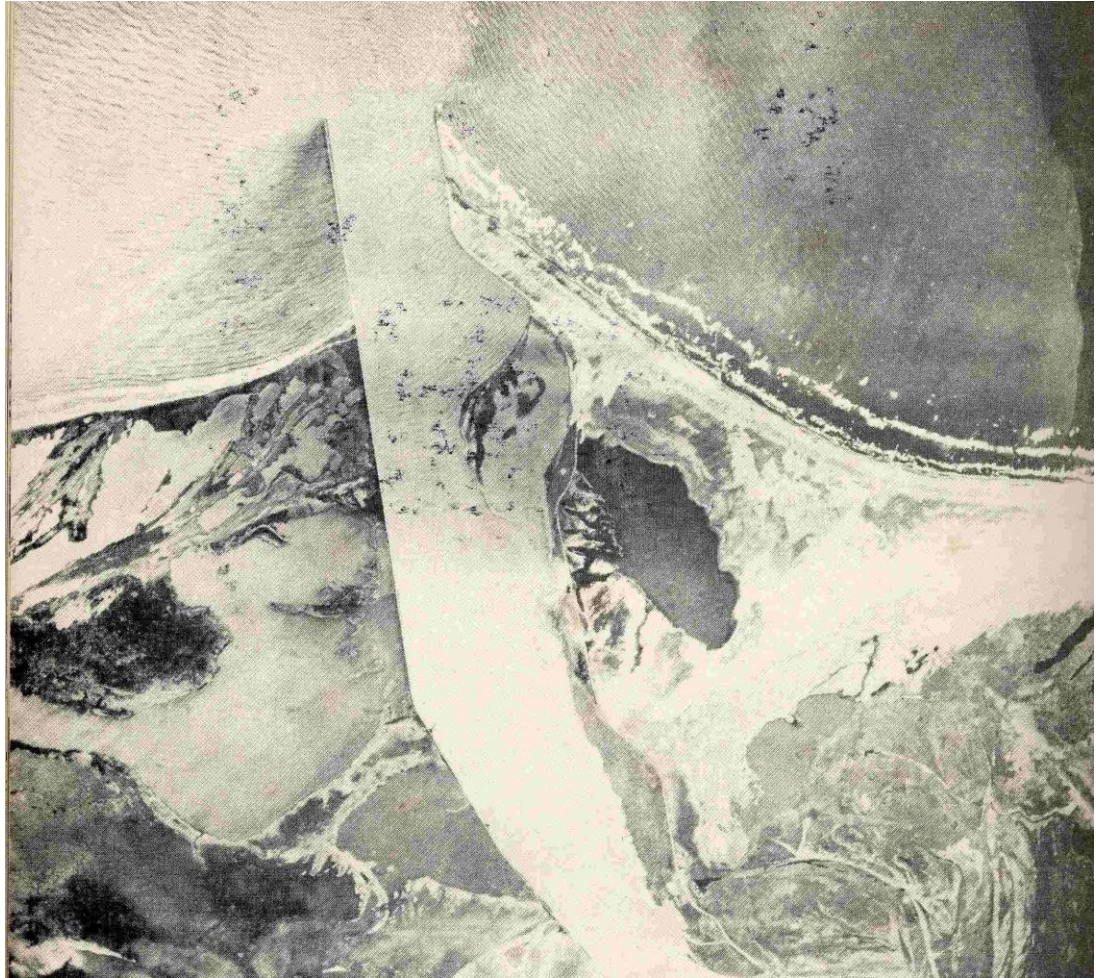
Figura 2-20. Reconstrucción de la línea de costa hasta ante de 1900.



Fuente: Von Erffa (1973).

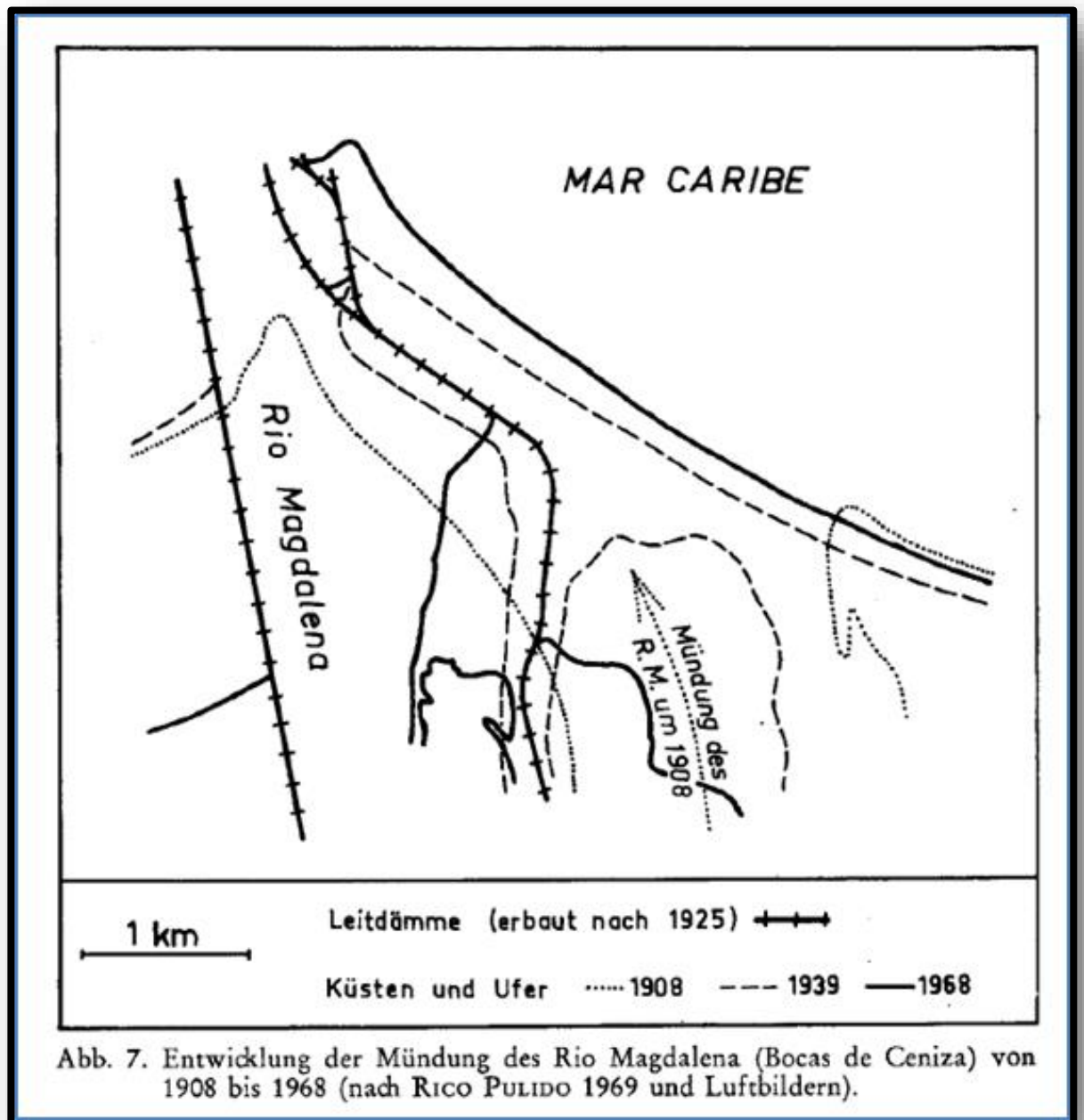
La construcción de los tajamares de Bocas de Cenizas en el año de 1936, fijaron la desembocadura en esta zona a fin que la dinámica del transporte de sedimentos con dirección predominante hacia el Oeste estableció una fuerte sedimentación en el lado oriental del tajamar que lleva este nombre generando una gran playa. Ver Figura 2-21

**Figura 2-21. Fotografía 1936 (E. Acevedo).**



*Fuente: E. Acevedo.*

Figura 2-22. Reconstrucción barra de sedimentos 1908 a 1968.



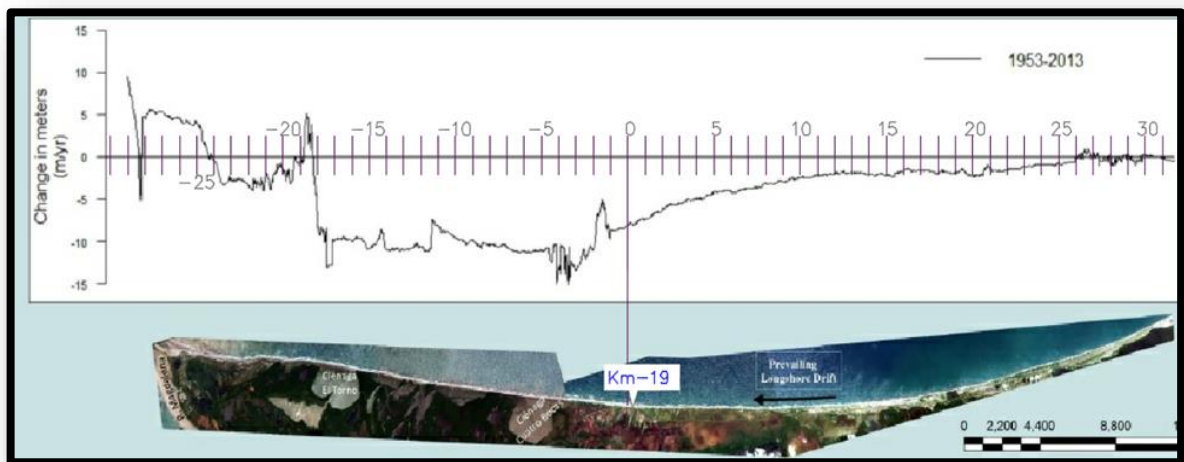
Fuente: Von Erffa (1973).

### 2.3.3.2. Periodo 1953-2013.

La Figura 2-22, muestra la evolución de la costa en la barra de salamanca durante el periodo de 1953-2013 (60 años), donde se indica la tasa media anual de avance/retroceso de la línea de costa, en base a la digitalización de fotografías aéreas. En esta figura se distingue un comportamiento diferente en las siguientes zonas, tomando como referencia (K0) el KM19 de la vía Barranquilla-Ciénaga, y en sentido Este a Oeste a lo largo de la línea de costa:

- Del K30 al K25, se observa un tramo costero estabilizado, sin avances/retrocesos significativos.
- Del K25 al K5, se observa una erosión uniforme, creciente a medida que se avanza hacia el oeste, de hasta 5 m/año.
- Del K5 al K-5, alrededor del KM19, se aprecia una erosión creciente desde 5 m/año (K5) hasta más de 10 m/año (K-5).
- Del K-5 al K-18 se aprecia una erosión generalizada en todo el tramo costero de entre 10 y 15 m/año.
- Del K-18 al K-25 la erosión se reduce bruscamente siendo inferior a 5 m/año en todo el tramo costero.
- Desde el K-25 hasta Bocas de Ceniza, se observa una sedimentación progresiva, con un avance de la línea de costa de entre 5 y 10 m/año.

**Figura 2-23. Variación de la línea de costa en la barra de Salamanca entre 1953 y 2013.**



*Fuente: Juan Felipe Gómez, Tesis MSc 2013.*

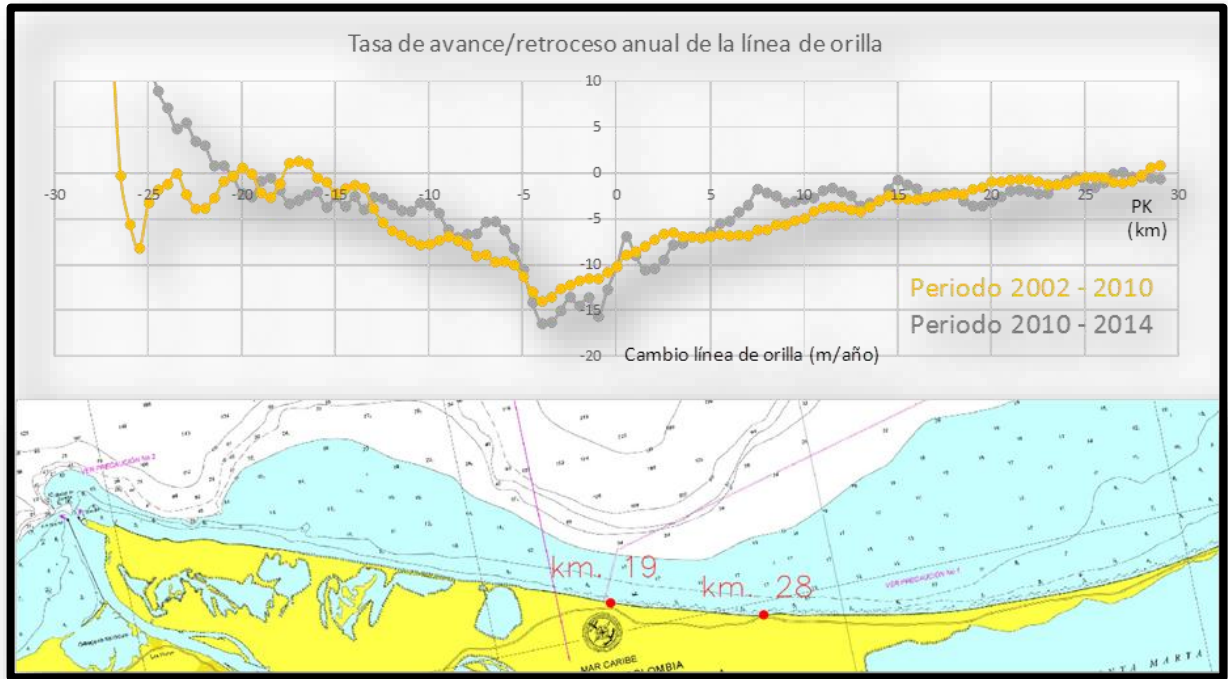
### **2.3.3.3. Periodo 2002 – 2014.**

La Figura 2-24, muestra la evolución de la costa en la barra de Salamanca durante los periodos de 2002-2010 (8 años) y 2010-2014 (4 años), donde se indica la tasa media anual de avance/retroceso de la línea de costa, en base a la digitalización de fotografías aéreas de Google Earth digitalizadas y corregidas.

Las principales diferencias que se observan en esta evolución reciente respecto a la observada en los últimos 60 años, descrita en el apartado anterior, son las siguientes:

- Se mantiene la estabilidad costera entre K30 y K25.
- Las tasas de erosión (retroceso de la línea de costa) entre K25 y K7.5 se reducen significativamente, siendo del orden de 2-3 m/año en el periodo más reciente, y siempre inferiores a los 5 m/año.
- El tramo entre el K7.5 y K-5 tiene una erosión progresiva, creciente a medida que avanza hacia el oeste, con una tasa de retroceso de 5 m/año (K7.5) hasta 15 m/año (K-5).
- La erosión en el tramo costero entre K-5 y K-20, que en el periodo 1953-2013 fue el de máxima erosión, con tasas de retroceso anual de la línea de costa superiores a 15 m/año, se reduce ahora de forma gradual a medida que se avanza hacia el Oeste, siendo máxima en el K-5 (retroceso medio de 15 m/año) y casi nula en K-20.
- Desde el K-20 hasta Bocas de Ceniza se observa una tendencia de sedimentación progresiva, creciente a medida que se avanza hacia el Oeste.



**Figura 2-24. Variación de la línea de costa en los periodos 2002-2010 y 2010-2014.**

Fuente: Fotografías Google Earth georeferenciadas.

## 2.4. ANÁLISIS DEL CLIMA MARÍTIMO

Este apartado permite caracterizar desde el punto de vista del clima marítimo, las condiciones que determinan los procesos hidrodinámicos que se presenta en la zona de estudio. Se inicia con el estudio del nivel medio del mar referido a las cotas del proyecto, estudio de vientos, oleaje en aguas profundas y determinación de oleajes (regímenes medio y extremal) en los puntos de interés a través de la aplicación de modelos numéricos llevados a boyas virtuales frente a la zona de estudio.

### 2.4.1. NIVEL MEDIO DEL MAR

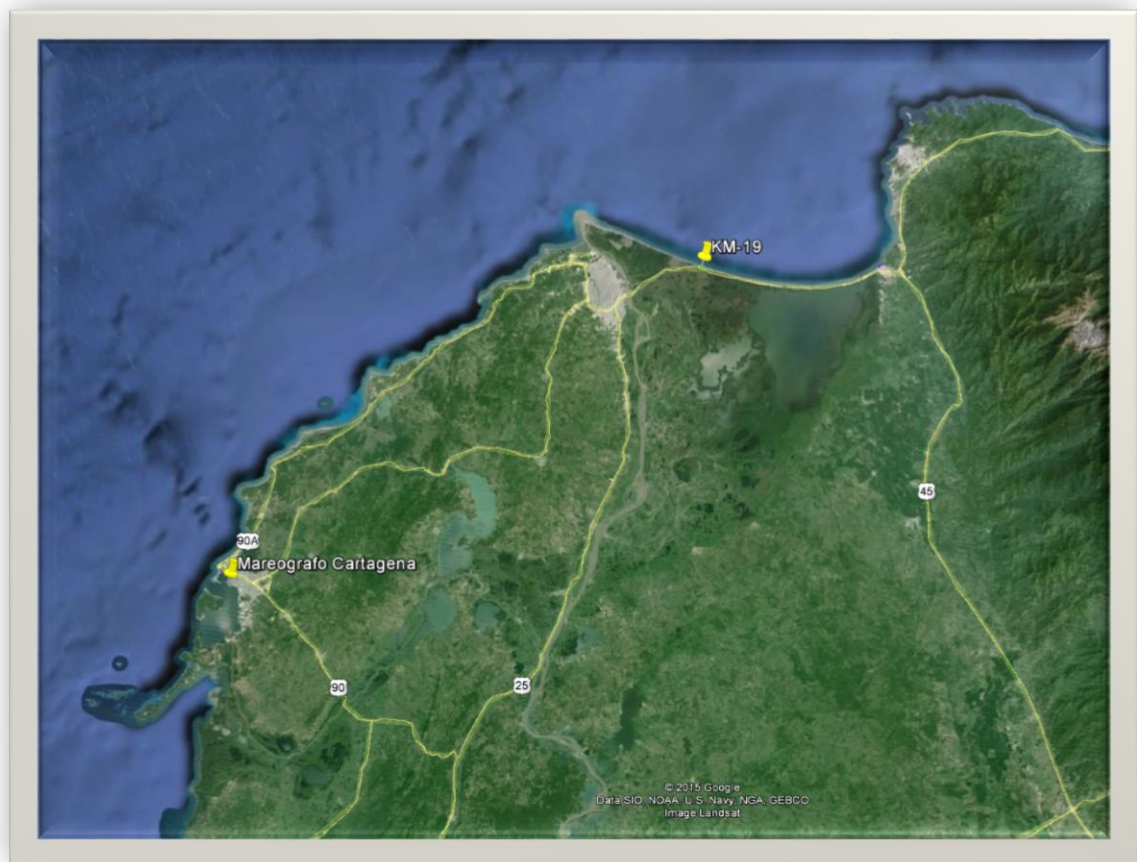
#### 2.4.1.1. Fuente de datos.

En la zona de estudio hay instalado mareógrafos, el más cercano que dispone de suficiente información y ha sido estudiado, corresponde sector de Cartagena, que pertenece a la red del IDEAM y son operados por el Centro de Investigaciones Oceanográfica de la Armada Nacional – CIOH.

A partir del análisis de la variación del mar con respecto estos datos, se determinará la variación de la marea para el sector de estudio para luego calcular los niveles característicos con respecto a los puntos de control del proyecto.

El mareógrafo de Cartagena se ubica en las coordenadas  $10^{\circ}23'23''\text{N}$ ,  $75^{\circ}31'59''\text{W}$ . Ver Figura 2-25.

**Figura 2-25. Ubicación Mareógrafo de Cartagena.**



*Fuente: Imagen de Google Earth georeferenciada*

### 2.4.1.2. Régimen mareal.

Los datos de mareógrafos en el Caribe colombiano se disponen para los puntos en Cartagena, Islas del Rosario y San Andrés (Molares, 2004). La marea en el Caribe es de tipo micromareal, debido a que su rango varía entre 20 y 30 cm y rara vez excede los 50 cm (Wiedemann, 1973). El estudio de Kjerfve (1981) identificó que los armónicos principales son M2, S2, K1, N2, O1 y P1, y construyó los mapas de estos constituyentes para el mar.

Lozano y Parra (1993) determinaron que para el caso de la bahía de Cartagena, la variación principal se debe a la componente K1, declinación lunar; las componentes que agrupan un 95% de amplitud de la marea son K1, O1, M2 y P1. Molares (2004) identificó que la marea en la costa colombiana es mixta, principalmente diurna. Ver Tabla 2-2. Principales componentes de marea en Cartagena de Indias registros 1990 – 2000 (Molares R, 2004. Clasificación e identificación de los componentes de marea del Caribe colombiano. Boletín científico CIOH, No 22, pp. 105 -114..

**Tabla 2-2. Principales componentes de marea en Cartagena de Indias registros 1990 – 2000 (Molares R, 2004. Clasificación e identificación de los componentes de marea del Caribe colombiano. Boletín científico CIOH, No 22, pp. 105 -114.**

Componente	Frecuencia	Período, h	Amplitud, cm	Fase, grad.
K1	0.04178	23.93	8.68	146.3
M2	0.08051	12.42	7.19	154.6
O1	0.03873	25.82	4.86	354.5
SSA	0.00023	4347.82	2.94	64.6
P1	0.04155	24.07	3.15	153.7
N2	0.07900	12.66	2.39	226.4
S2	0.08333	12.00	1.65	240.0
MF	0.00305	327.87	1.15	128.3
Q1	0.03722	26.86	0.76	82.3
NO1	0.04027	24.83	0.55	260.3

Si sumamos las amplitudes de las componentes armónicas de tipo diurno (K1, O1, P1, Q1 y NO1) y de tipo semidiurno (M2, N2 y S2), resulta una amplitud máxima de 29.23 cm. En base a este resultado, se considerará que la marea astronómica, a efectos de cálculo, tiene una amplitud máxima de 30 cm.

### 2.4.1.3. Niveles característicos.

Los niveles del mar característicos de la marea astronómica en la zona de estudio son los siguientes:

<b>NIVEL CARACTERÍSTICO</b>	<b>COTAS</b>
<i>Nivel de Pleamar de Sicigia (N.P.S.)</i>	-0.30 m
<i>Nivel Medio del Mar (N.M.M.)</i>	-0.60 m
<i>Nivel Bajamar de Sicigia (N.B.S.)</i>	-0.90 m



#### **2.4.1.4. Otras variaciones del nivel medio del mar.**

##### **Marea meteorológica**

En base al análisis de las desviaciones de los registros del nivel medio del mar respecto a la marea astronómica, es posible observar desviaciones (“residuos”) asociadas a variaciones barométricas y mareas meteorológicas. En la zona de proyecto, y en base al análisis del mareógrafo de Cartagena, dichas desviaciones pueden presentar un valor máximo de 20 cm.

##### **Set-up inducido por viento**

Otro fenómeno posible que puede inducir variaciones del nivel medio del mar en la zona de proyecto es el viento, que genera un sobre-elevación del nivel medio (set-up) debido a la fricción que produce el viento sobre la superficie del mar.

Por ejemplo para un sector abierto como en KM-19, este fenómeno puede presentarse para los vientos dominantes (alisios, de los sectores NE y ENE) en el fetch definido entre la costa de Santa Marta y la zona de proyecto. Ver Figura 2-26

**Figura 2-26. Zona de generación del ascenso del nivel medio del mar en la zona de proyecto debido a vientos de dirección NE y ENE. Longitud media fetch = 50 km.**



*Fuente: Imagen de Google Earth georeferenciada.*

El set-up inducido por viento en la zona puede estimarse en base a la formulación del balance de momentum en la dirección del viento:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{kW^2}{g(h + \eta)}$$

Considerando, para el presente caso,

- W (velocidad máxima del viento) = 20 m/s
- g (aceleración de la gravedad) = 9.816 m/s<sup>2</sup>
- k (parámetro de rugosidad adimensional) = 1.2\*10<sup>-6</sup>

Se obtiene una estima del set-up inducido por el viento, que resulta ser de **2.5 cm**.

### **Cambio climático**

El documento “Lineamientos para la adaptación al cambio climático de Cartagena de Indias. Proyecto Integración de la Adaptación Al Cambio Climático en la Planificación

Territorial y Gestión Sectorial de Cartagena de Indias” (INVEMAR-MADS-Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias-CDKN, 2012) considera la variación del nivel medio del mar asociado al cambio climático como uno de los elementos importantes a considerar en la planificación de las infraestructuras y el desarrollo social.

Andrade (2002) y Restrepo y López (2008) apuntan un incremento del nivel medio del mar del orden de 15-20 cm en el periodo 2010-2040 (30 años). Esta estimación, muy conservadora contrastada con los del panel del IPCC, nos permite considerar un incremento anual del nivel medio del mar de **0.5 cm/año**.

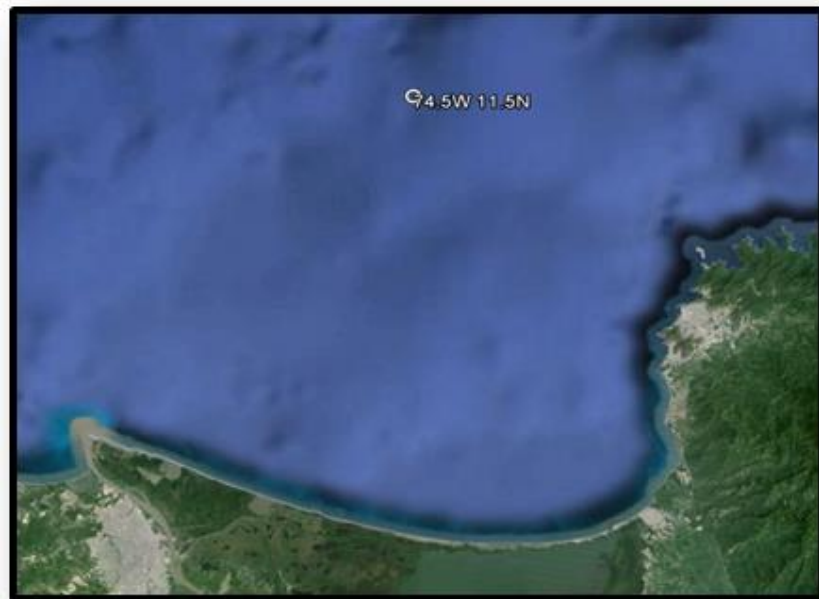
## 2.4.2. VIENTO

### 2.4.2.1. Fuente de datos.

Los datos de viento considerados para el estudio son datos del campo de vientos NOAA, datos de entrada del modelo Wavewatch III para oleaje.

Se ha seleccionado el nodo de posición 11.5°N – 74.5°W para caracterizar el régimen de viento.

**Figura 2-27. Imagen aérea con la localización del punto de referencia del registro de datos y del presente proyecto.**



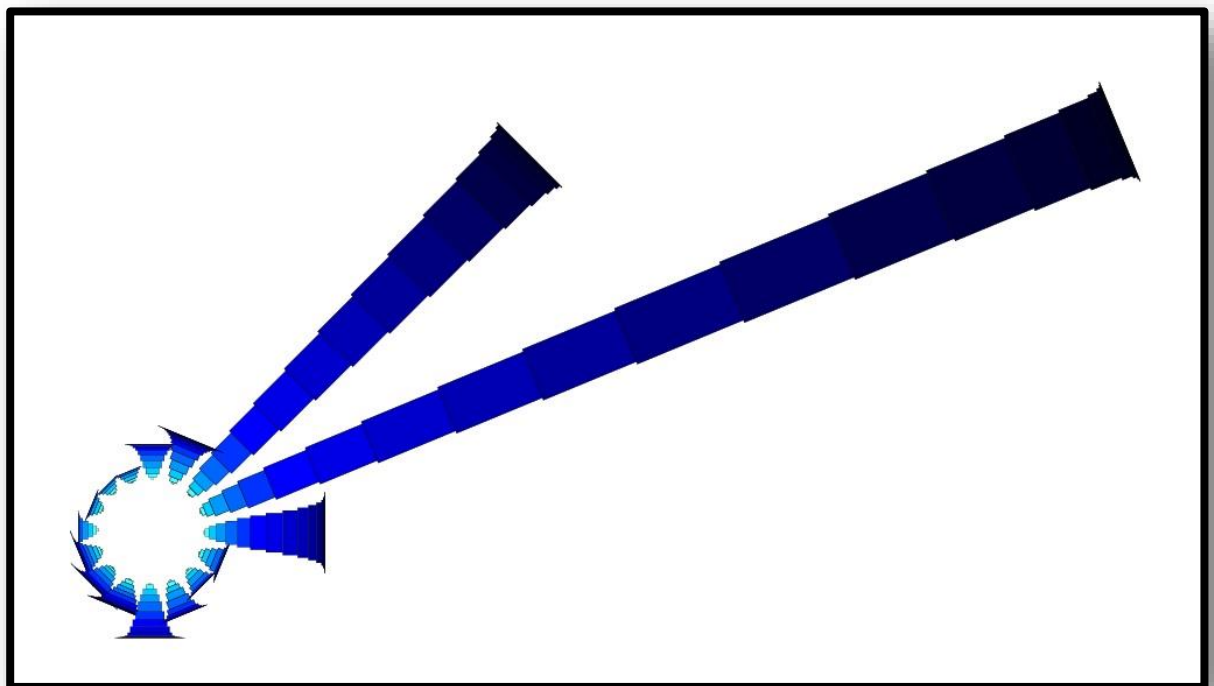
*Fuente: Imagen de Google Earth georeferenciada.*

El periodo de registro analizado abarca desde el 1 de febrero de 2005 hasta el 31 de enero de 2014, es decir un total de 9 años. Previamente al análisis estadístico de los datos para determinar la distribución sectorial y el régimen medio, se han analizado los periodos de tiempo en que no existe ningún registro en la muestra de datos (huecos). En este caso, el registro es continuo y no hay huecos en toda la serie de datos.

#### 2.4.2.2. Distribución sectorial del viento.

La distribución sectorial del viento (en sectores de  $22.5^\circ$ ) se puede observar claramente en la correspondiente rosa de viento anual (Ver Figura 2-28) definida a partir del conjunto de datos. En la Figura 2-29, se recoge el número de observaciones clasificadas según el sector de incidencia y los valores de la velocidad media,  $V_{10}$  (m/s).

Figura 2-28. Rosa de viento anual.



Fuente:NOAA

A la vista de la rosa de viento obtenida se observa que los vientos con mayor frecuencia de presentación así como mayor intensidad son los provenientes de los sectores NE y ENE, conocidos como alisios y de marcada estacionalidad (como se constata en el siguiente apartado).

Tabla 2-3. Tabla de presentación sectorial del viento (anual).

Sector \ V10 (m/s)	<1	<2	<3	<4	<5	<6	<7	<8	<9	<10	<11	<12	<13	<14	<15	<16	<17	<18	<19	<20	<21	TOTAL	TOTAL
N	23	45	86	93	83	58	36	26	13	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	469	1.8%
NNE	21	61	98	119	116	88	51	34	23	18	11	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	646	2.5%
NE	14	69	112	158	261	382	487	625	672	666	728	708	657	464	262	136	59	10	1	0	0	6471	24.6%
ENE	17	54	106	206	244	391	623	829	1126	1246	1351	1542	1595	1440	1146	804	438	145	49	14	7	13373	50.9%
E	23	58	89	129	156	179	208	224	202	144	107	69	21	14	6	4	2	0	0	0	0	1635	6.2%
ESE	16	50	75	77	75	22	10	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	335	1.3%
SE	19	41	62	80	61	24	6	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	298	1.1%
SSE	23	60	69	103	110	69	36	20	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	496	1.9%
S	17	53	78	97	130	113	91	82	39	16	5	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	726	2.8%
SSW	10	54	58	55	50	62	53	35	16	9	6	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	419	1.6%
SW	12	28	49	66	65	70	36	20	8	7	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	364	1.4%
WSW	18	38	57	60	46	43	25	10	4	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	304	1.2%
W	30	50	66	74	33	12	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	273	1.0%
WNW	18	40	51	40	16	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	171	0.7%
NW	19	37	49	32	16	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	155	0.6%
NNW	12	32	49	39	23	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	159	0.6%
TOTAL	292	770	1154	1428	1485	1523	1671	1917	2111	2112	2212	2337	2277	1921	1415	944	499	155	50	14	7	26294	100.0%
TOTAL	1.1%	2.9%	4.4%	5.4%	5.6%	5.8%	6.4%	7.3%	8.0%	8.0%	8.4%	8.9%	8.7%	7.3%	5.4%	3.6%	1.9%	0.6%	0.2%	0.1%	0.03%	100.0%	

### 2.4.2.3. Régimen escalar de la velocidad del viento.

El régimen medio de cualquier variable ambiental relaciona los diversos niveles de la misma con la probabilidad de que dichos niveles no sean superados en un periodo de tiempo igual a un año medio.

Se denomina régimen medio escalar a la función de distribución estadística que define el porcentaje de tiempo que, en el año medio, la variable no excede un determinado valor.

El procedimiento más habitual, por su sencillez, es determinar la probabilidad de no excedencia de un determinado nivel de velocidad media de viento a partir de los datos muestrales. Careciendo de interés en este caso el ajuste de una función de distribución, se presenta tabulada, la distribución empírica de los datos de viento; tanto para todos los datos agrupados, como para los datos por meses:

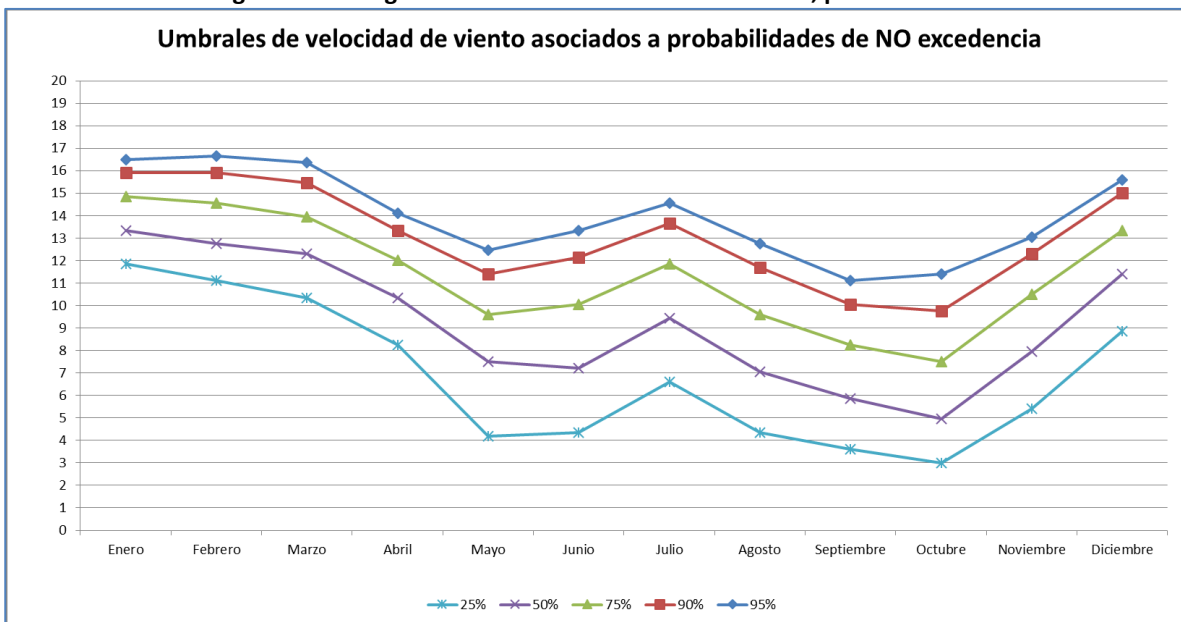
**Tabla 2-4. Umbrales de velocidad de viento asociados a probabilidad de no excedencia, datos totales.**

Probabilidad de NO excedencia	Velocidad de viento V10 (m/s)
0.10%	0.15
10%	3.30
20%	4.95
25%	5.85
30%	6.75
40%	8.10
50%	9.30
60%	10.50
70%	11.70
75%	12.30
80%	12.75
85%	13.50
90%	14.25
95%	15.15
98%	16.20
99%	16.80

Tabla 2-5. Umbrales de velocidad de viento asociados a probabilidad de no excedencia, para cada mes.

Probabilidad de no excedencia	Velocidad de viento V10 (m/s)											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic.
10%	9.75	9.75	8.4	5.85	2.4	2.55	3.9	2.55	2.4	1.8	3.3	6.6
20%	11.4	10.8	9.75	7.5	3.45	3.75	5.7	3.9	3.15	2.7	4.65	8.25
25%	11.85	11.1	10.35	8.25	4.2	4.35	6.6	4.35	3.6	3	5.4	8.85
30%	12.15	11.55	10.8	8.7	4.95	4.8	7.2	4.95	4.05	3.45	6	9.45
40%	12.75	12.3	11.55	9.6	6.3	6	8.4	6	4.8	4.2	7.05	10.65
50%	13.35	12.75	12.3	10.35	7.5	7.2	9.45	7.05	5.85	4.95	7.95	11.4
60%	13.95	13.5	13.05	10.95	8.4	8.25	10.5	7.95	6.6	5.85	8.55	12.3
70%	14.55	14.1	13.65	11.7	9.15	9.45	11.4	9	7.65	6.9	9.75	13.05
75%	14.85	14.55	13.95	12	9.6	10.05	11.85	9.6	8.25	7.5	10.5	13.35
80%	15.15	14.85	14.4	12.45	10.2	10.65	12.45	10.2	8.7	7.95	10.95	13.8
85%	15.6	15.3	14.85	12.75	10.8	11.4	12.9	10.95	9.3	8.85	11.7	14.25
90%	15.9	15.9	15.45	13.35	11.4	12.15	13.65	11.7	10.05	9.75	12.3	15
95%	16.5	16.65	16.35	14.1	12.45	13.35	14.55	12.75	11.1	11.4	13.05	15.6
98%	17.25	17.25	17.4	15	13.5	14.4	15.45	13.8	12.15	12.9	13.8	16.35
99%	17.85	17.55	18.45	15.6	14.4	15	15.9	14.4	12.75	13.05	14.25	16.8



**Figura 2-29. Régimen medio de la velocidad de viento, por meses.**

Fuente: Propia

### 2.4.3. OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS

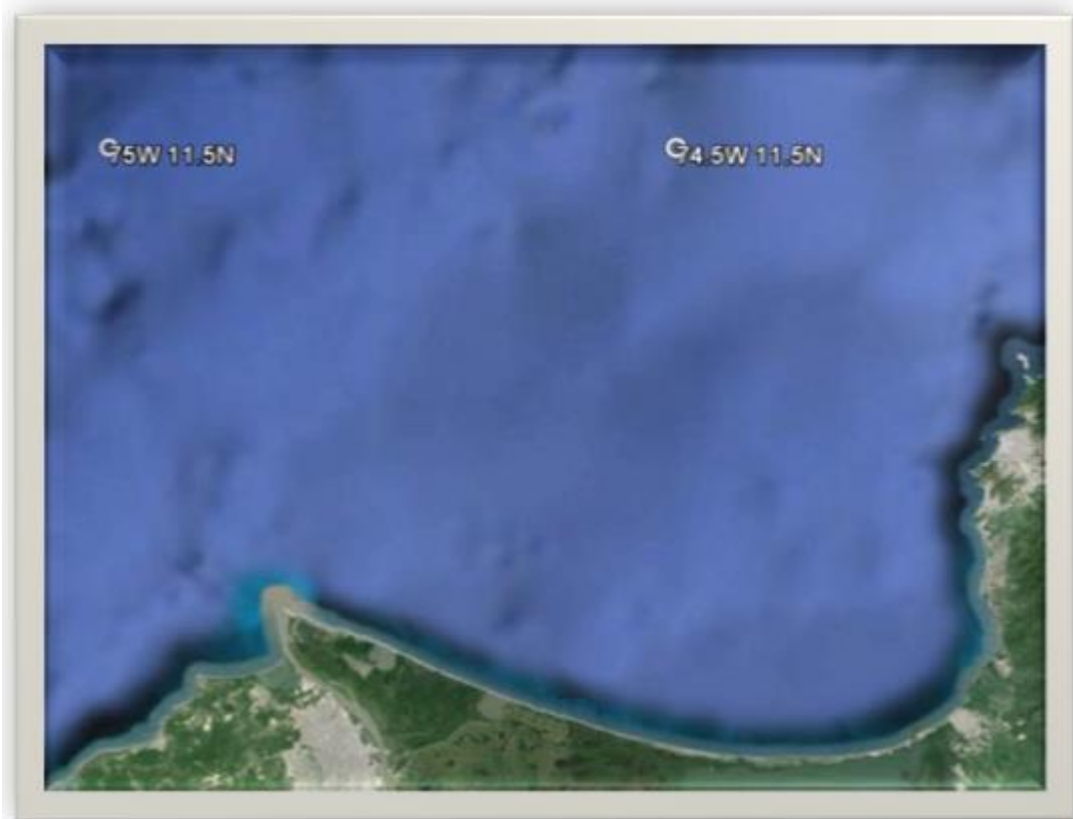
#### 2.4.3.1. Fuente de datos.

Los conjuntos de datos considerados para caracterizar el régimen de oleaje frente a la costa de la zona Salamanca son datos obtenidos mediante el modelo Wavewatch de la NOAA a partir de datos del campo de vientos conocido.

Se han utilizado dos nodos de datos del modelo Wavewatch, tal como muestra la Figura 2-30

- ❖ Nodo "NE" en 11.5°N – 74,5°W. "Conjunto NE"
- ❖ Nodo "NW" en 11.5°N - 75°W. "Conjunto NW"

Con objeto de obtener los oleajes más representativos se han filtrado datos de estos nodos en función de la dirección del dato individual de oleaje formando el conjunto de datos a propagar: El nodo "NW" representa mejor las olas incidentes correspondientes a sectores de las zonas oeste, y mientras que el NE representa muy convenientemente el resto de datos. En el apartado siguiente se presenta la distribución sectorial de cada uno de ellos.

**Figura 2-30. Localización de las fuentes de datos de oleaje.**

*Fuente: Imagen de Google Earth georeferenciada.*

El periodo de registro analizado abarca desde el 1 de febrero de 2005 hasta el 31 de enero de 2014, es decir un total de 9 años. Previamente al análisis estadístico de los datos para determinar la distribución sectorial y el régimen medio, se han analizado los periodos de tiempo en que no existe ningún registro en la muestra de datos (huecos). En este caso, el registro es continuo y no hay huecos en toda la serie de datos.

#### **2.4.3.2. Distribución sectorial del oleaje.**

La distribución sectorial del oleaje (en sectores de  $22.5^\circ$ ), puede apreciarse claramente en las correspondientes rosas de oleaje (ver Figura 2-31 y Figura 2-32) para cada conjunto de datos considerado. En la Tabla 2-6 y Tabla 2-7 se recoge el número de observaciones clasificadas por sectores de incidencia del oleaje y por valores de la altura de ola significativa.

A la vista de las rosas obtenidas, se observa que la gran mayoría de olas provienen del sector NNE-NE, que también presenta con mayor frecuencia alturas de ola mayores. También se pone de manifiesto la presencia de algunos oleajes energéticos en los sectores WSW y NW-NNW.

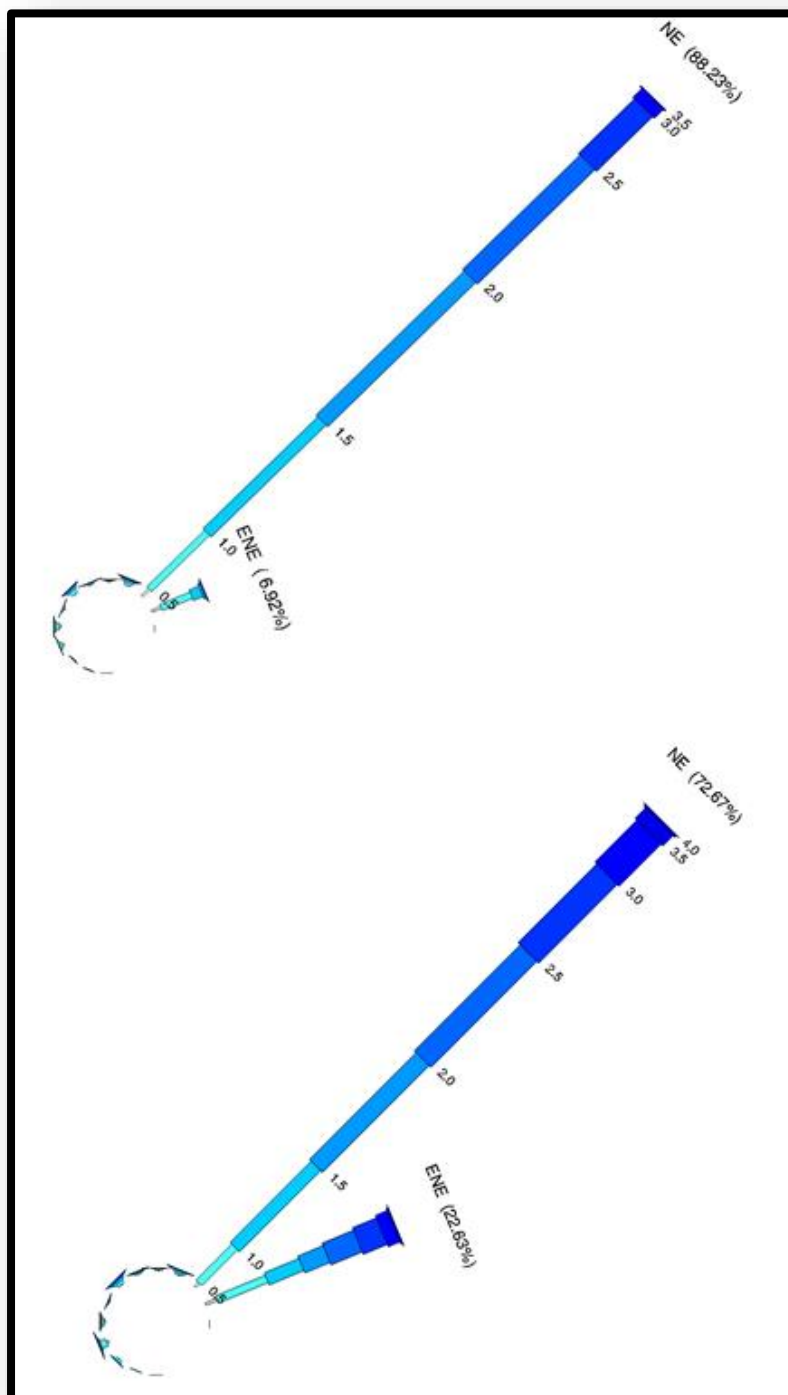
**Tabla 2-6. Tabla de presentación sectorial del oleaje nodo “NE”.**

Sector \ Hs	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	TOTAL
N	22	37	26	2	0	4	0	0	0	91
NNE	22	88	80	23	34	5	0	0	0	252
NE	336	2618	5209	6716	5325	2549	404	44	0	23201
ENE	326	1049	325	78	35	7	0	0	0	1820
E	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S	0	2	4	0	0	0	0	0	0	6
SSW	0	16	10	0	0	0	0	0	0	26
SW	1	29	10	0	0	0	0	0	0	40
WSW	66	80	18	8	2	0	0	0	0	174
W	53	114	48	11	4	0	0	0	0	230
WNW	35	36	9	3	3	0	0	0	0	86
NW	26	120	73	35	24	0	0	0	0	278
NNW	19	43	17	10	1	1	0	0	0	91
TOTAL	906	4233	5829	6886	5428	2566	404	44	0	26296

**Tabla 2-7. Tabla de presentación sectorial del oleaje nodo “NW”.**

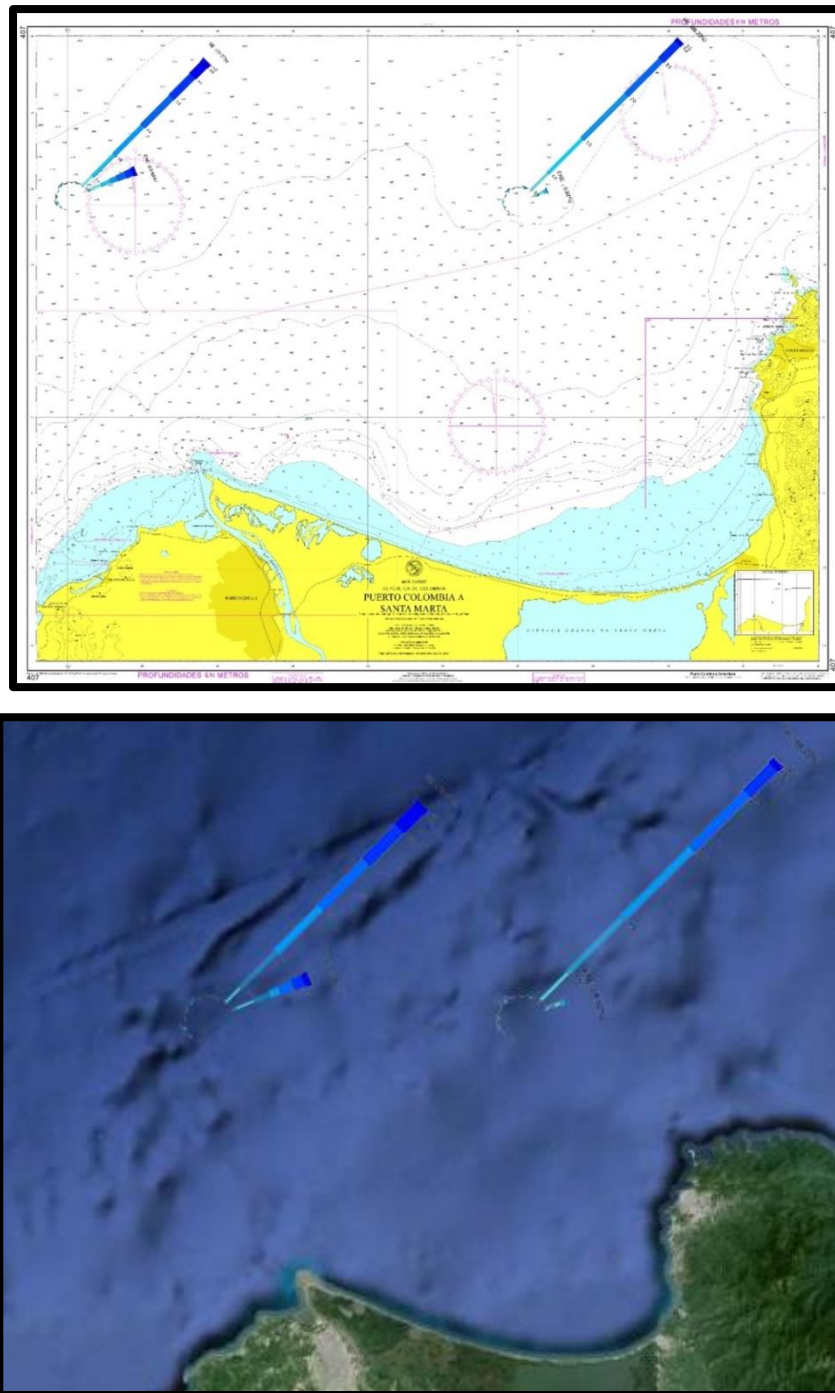
Sector \ Hs	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	TOTAL
N	22	38	20	0	1	4	1	0	0	0	86
NNE	16	59	62	9	12	10	0	0	0	0	168
NE	164	1468	3332	4369	4336	3221	1719	427	68	5	19109
ENE	356	1559	1089	789	985	749	370	46	9	0	5952
E	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
ESE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SSE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	3
SSW	0	7	3	0	0	0	0	0	0	0	10
SW	23	70	25	1	0	0	0	0	0	0	119
WSW	72	167	38	12	15	4	0	0	0	0	308
W	34	69	44	6	0	0	0	0	0	0	153
WNW	20	25	13	1	0	0	0	0	0	0	59
NW	14	85	65	35	30	3	0	0	0	0	232
NNW	11	44	21	17	3	0	0	0	0	0	96
TOTAL	732	3593	4714	5239	5382	3991	2090	473	77	5	26296

Figura 2-31. Rosas de oleaje anual. Nodos NE (arriba) y NW (abajo).



Fuente: Propia

Figura 2-32. Rosas de oleaje en aguas profundas posicionadas sobre imagen satelital y carta náutica.



Fuente: Propia

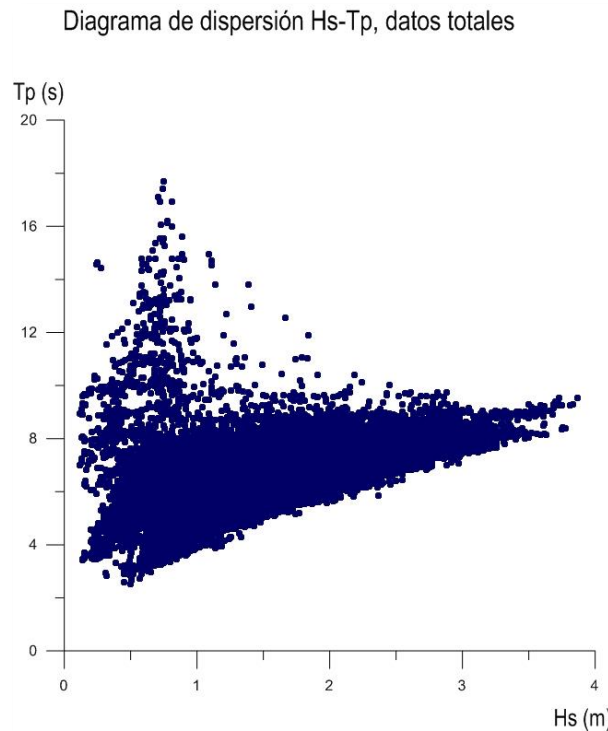
#### 2.4.3.3. Periodos del oleaje.

En este apartado se analiza la correlación entre los parámetros altura de ola significativa ( $H_s$ ) y período de pico del oleaje ( $T_p$ ) para el conjunto de datos recogidos en aguas profundas.

La Figura 2-33 muestra el diagrama de dispersión para la totalidad de los datos de oleaje seleccionados, donde puede observarse la existencia de 2 grupos diferenciados:

- Oleaje tipo “sea”, el más frecuente, generado por vientos locales en el Mar Caribe, caracterizados por un período de pico relativamente pequeño (inferior a 10 s), y una elevada correlación entre las variables  $H_s$  y  $T_p$ .
- Oleaje tipo “swell”, generada por vientos en el océano Atlántico, que penetran el Mar Caribe, caracterizados por valores elevados del período de pico ( $T_p > 10$  s) y reducida energía ( $H_s < 1,5$  m).

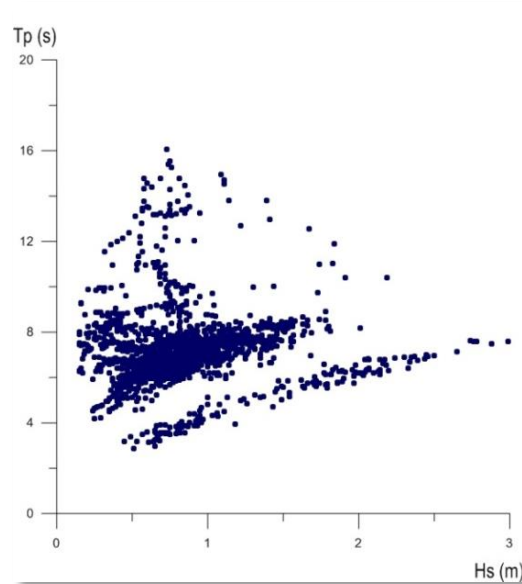
**Figura 2-33. Diagrama de dispersión entre las variables altura de ola y periodo de pico. Datos Conjunto a propagar, datos totales.**



*Fuente: Propia*

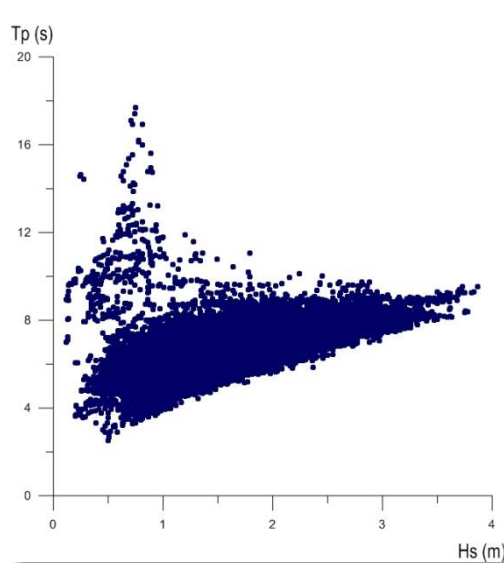
De la Figura 2-34 a la Figura 2-43, se muestran los diagramas de dispersión de las variables Hs y Tp para distintos sectores de incidencia del oleaje en aguas profundas.

**Figura 2-34. Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa (Hs) y el período de pico (Tp). Sector ENE.**



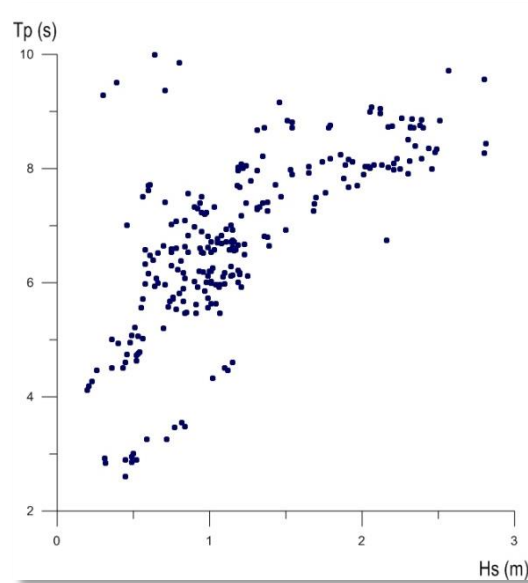
*Fuente: Propia*

**Figura 2-35. Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa (Hs) y el período de pico (Tp). Sector NE.**



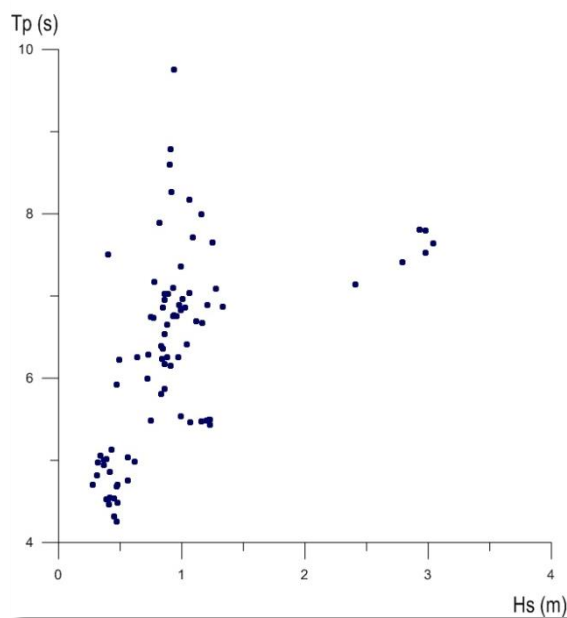
*Fuente: Propia*

**Figura 2-36.** Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector NW.



*Fuente: Propia*

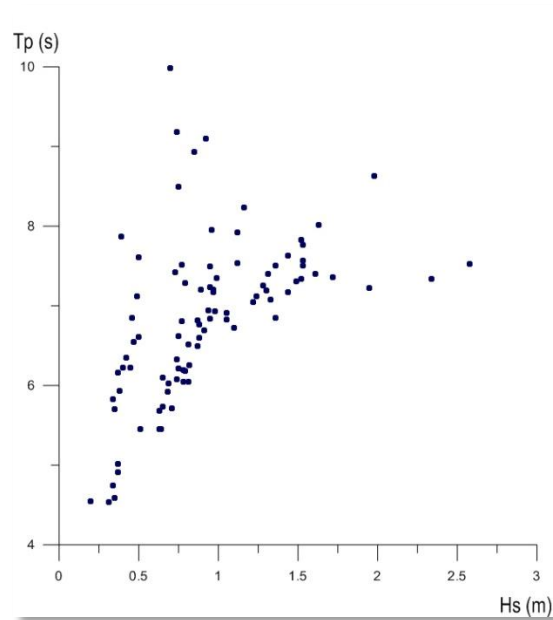
**Figura 2-37.** Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector ENE.



*Fuente: Propia*

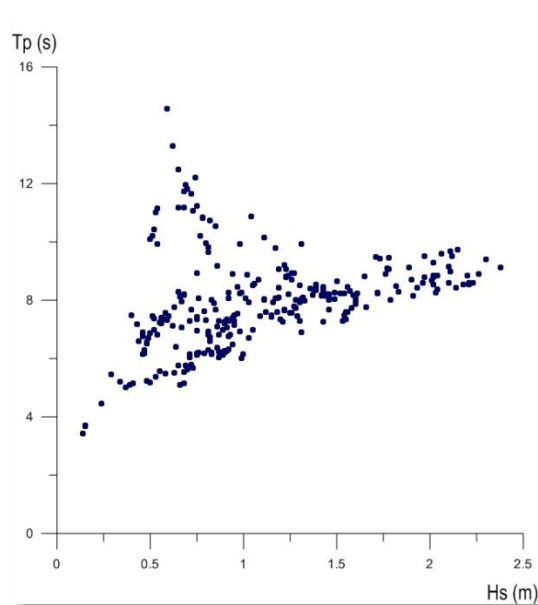


**Figura 2-38.** Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector NNW.



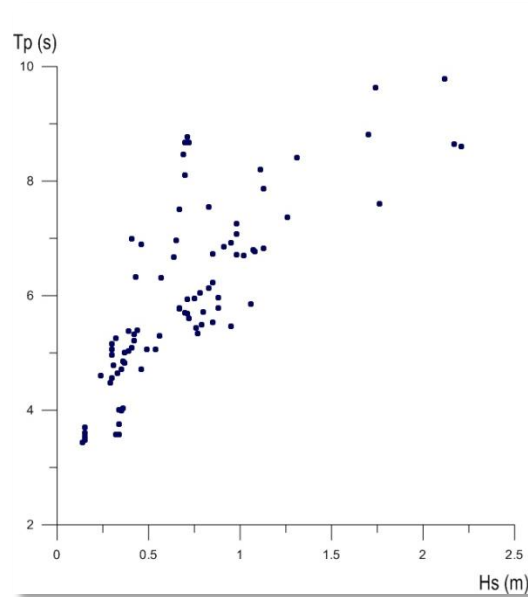
*Fuente: Propia*

**Figura 2-39.** Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector NW.



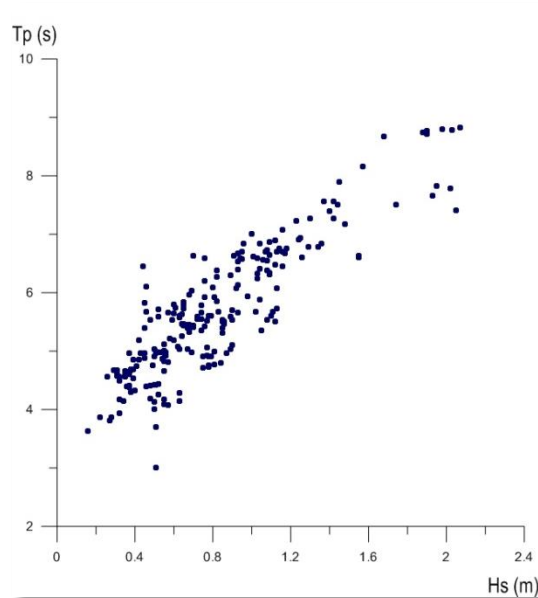
*Fuente: Propia*

**Figura 2-40.** Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector WNW.



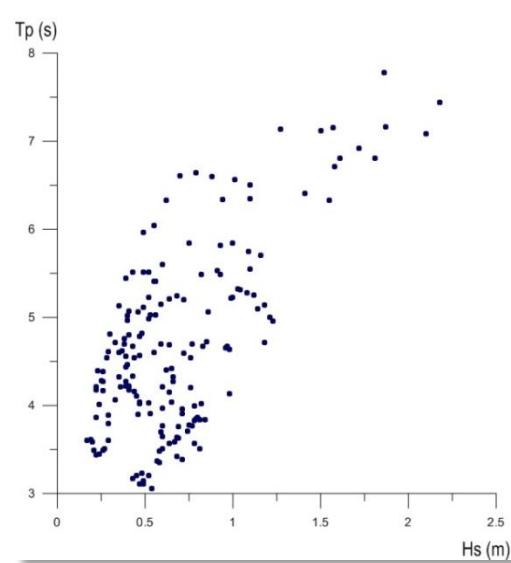
*Fuente: Propia*

**Figura 2-41.** Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector W.



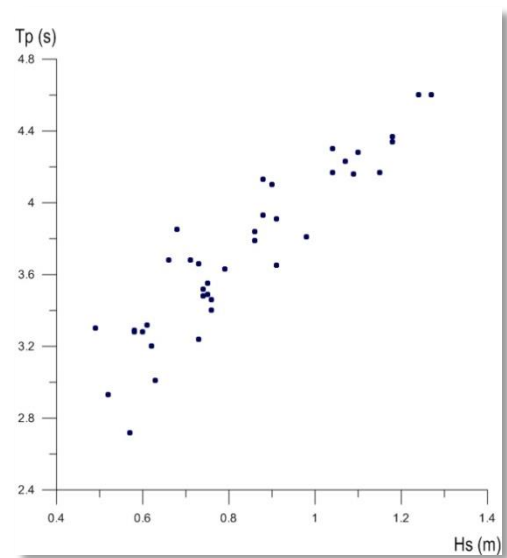
*Fuente: Propia*

**Figura 2-42.** Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector WSW.



*Fuente: Propia*

**Figura 2-43.** Diagrama de dispersión que muestra la correlación entre las variables altura de ola significativa ( $H_s$ ) y el período de pico ( $T_p$ ). Sector SW.



*Fuente: Propia*

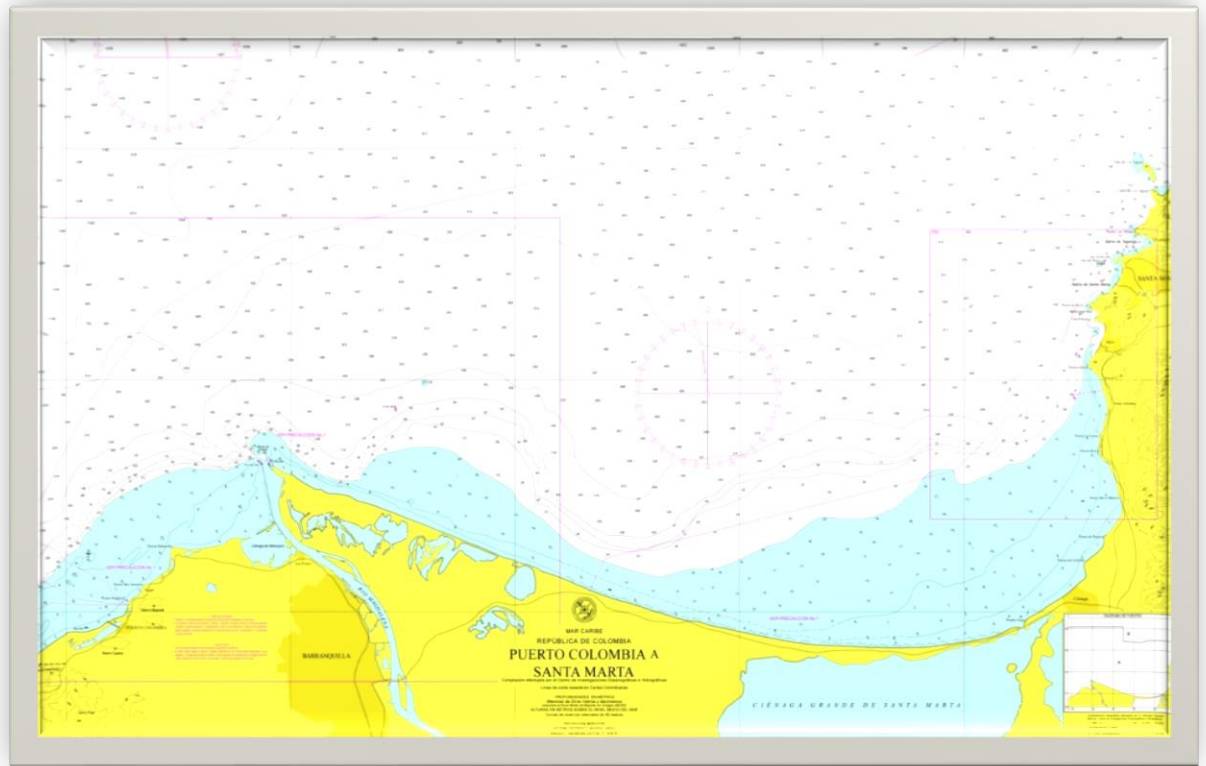
#### **2.4.4. OLEAJE FRENTE A LA COSTA**

##### **2.4.4.1. Consideraciones Previas.**

El análisis de propagación del oleaje desde mar abierto hasta las inmediaciones de la zona de interés tiene como objetivo la simulación de los fenómenos que modifican el oleaje en su aproximación desde aguas profundas hasta la costa, por efecto de la batimetría, de tal forma que sea posible caracterizar adecuadamente el régimen de oleaje incidente sobre la zona de proyecto.

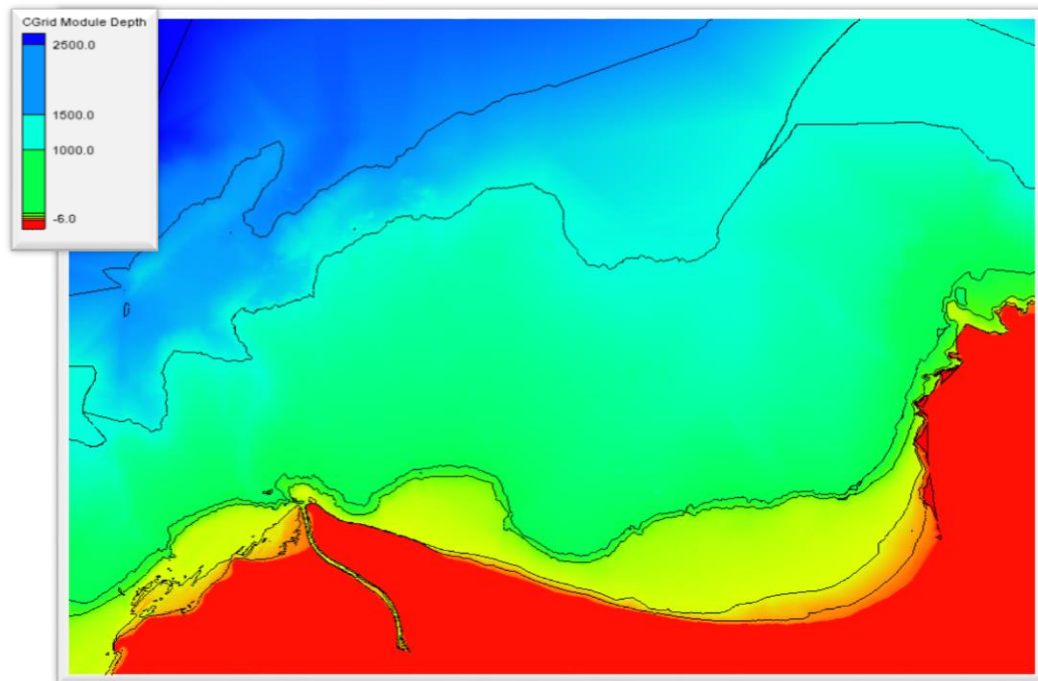
La Figura 2-44 muestra la carta náutica de la zona de proyecto, donde se recoge la batimetría existente frente a la costa de Salamanca. Esta información batimétrica se ha complementado con las campañas batimétricas obtenidas en los estudios anteriores que ha realizado la Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-44. Carta náutica y batimetría de la zona de estudio de propagación del oleaje. La zona coloreada en azul muestra las aguas someras, con profundidades inferiores a 20 m. En círculo rojo se señala el emplazamiento del proyecto (K19).**



*Fuente: Dimar.*

Figura 2-45. Batimetría digitalizada.



Fuente: Propia.

#### 2.4.4.2. Propagación del Oleaje Frente a la Costa.

El modelo numérico empleado para simular la propagación del oleaje ha sido el código CMS-Wave, que simula de forma combinada los efectos de asomeramiento (*"shoaling"*), refracción, difracción y disipación de energía por rotura del oleaje, así como los efectos de la dispersión direccional e irregularidad (frecuencial) del oleaje incidente.

##### - Descripción del Modelo

El SMS - Surface Water Modeling System, es una interfaz en donde se integran módulos que componen varios modelos hidráulicos. Estos módulos para la solución numérica pueden utilizar dos métodos diferentes de solución de las ecuaciones que gobiernan los diferentes procesos, estos son: Diferencias finitas y Elementos finitos. De los módulos disponibles se ha utilizado el que tiene que ver con la propagación del oleaje denominado CMS-WAVE.

El CMS-WAVE es un modelo bidimensional que calcula la transformación de la energía espectral del oleaje empleando un método de diferencias finitas hacia adelante resolviendo la ecuación de conservación de acción del oleaje.

$$\frac{d(C_x C)}{dx} + \frac{d(C_y N)}{dy} + \frac{d(C_\theta N)}{d\theta}$$

$$= \frac{K}{2\sigma} \left[ (C C_g \cos^2 \theta N_y)_y - \frac{C C_g}{2} \cos^2 \theta_{yy} \right] - \varepsilon_b N - S$$

Donde:

$$N = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

En las ecuaciones anteriores la densidad de acción de las olas es función de la frecuencia y de la dirección. El término  $E(\sigma, \theta)$  representa la densidad espectral que representa la energía del oleaje por unidad de área por intervalo de frecuencia. En la ecuación anterior los términos de refracción, difracción y disipación de la energía son incluidos en el término a la derecha de la igualdad. Los esquemas de solución numérica de la ecuación anterior son descritas en (Mase et al., 2005) y (Mase, 2001).

**Efecto de la Difracción debido al oleaje:** El término de difracción del oleaje insertado en la ecuación de balance de acción de la ola tiene una formulación parabólica (Mase, 2001). La intensidad de la difracción es un valor que se encuentra entre 0 y 4, donde 0 omite la difracción y 4 presenta el valor más fuerte. Como valor por defecto  $k$  es igual a 2.5, ampliamente usado en la modelación de rompeolas y espolones semi-infinitos o en desembocaduras.

**Interacción Ola – Corriente:** Las velocidades características  $C_x$ ,  $C_y$  y  $C_\theta$  en la ecuación son el resultado de las siguientes expresiones:

$$C_x = C_g \cos \theta + U$$

$$C_y = C_g \sin \theta + V$$

$$C_\theta = \frac{\theta}{\sin h \, 2kh} \left( \sin \theta \frac{dh}{dx} - \cos \theta \frac{dh}{dy} \right) + \cos \theta \sin \theta \frac{dU}{dx} - \cos^2 \theta \frac{dU}{dy} + \sin^2 \theta \frac{dV}{dx} - \sin \theta \cos \theta \frac{dV}{dy}$$

Donde  $U$  y  $V$  son las componentes a lo largo de los ejes  $x$  y  $y$  de las velocidades de la corriente promediadas en la vertical,  $k$  en el número de ola, y  $h$  es la profundidad del agua. A su turno la relación existente entre la frecuencia angular relativa, la frecuencia absoluta, el vector número de ola  $\vec{\theta}$  y la magnitud de la velocidad de la corriente  $|\vec{U}| = \sqrt{U^2 + V^2}$  esta dada por:

$$\theta = \omega - \vec{K} \cdot \vec{U}$$

Y,

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad.

**Reflexión del oleaje:** Asume que el ángulo de reflexión de la ola incidentes es igual a la de la ola reflejada y que la energía de la ola reflejada es una fracción de la energía incidente. Para lo cual asume un factor Kr. La ecuación de cálculo se presenta a continuación:

$$Nr = Kr^2 Ni$$

Donde Kr es un coeficiente que varía entre 0 y 1 (0 para eliminación de la reflexión, 1 para reflexión completa) (Dean & Dalrymple, 1984). El modelo también permite calcular la reflexión hacia atrás mediante una subrutina que afecta directamente el tiempo de cálculo del programa a casi el doble del tiempo que demora el programa en converger (Dean & Dalrymple, 1984).

**Ecuaciones de Rompimiento:** Hace algunos años, un criterio simple de rompimiento estaba expresado por:

$$\frac{Hb}{h} \leq 0.64$$

Donde  $Hb$  denota la altura de la ola en el momento del rompimiento. CMS aplica un concepto más completo que para olas aleatorias es:

$$Hb \leq \frac{0.64}{k_p} \tanh(k_p h)$$

Sin embargo la energía disipada por el rompimiento puede ser calculada mediante las ecuaciones de: Goda Extendido (Sakai et al., 1989), Miche Extendido (Battjes, 1992-2004) (Mase et al., 2005), Battjes y Janssen (Mase et al., 2005), Chawla y Kirby (Chawla & Kirby, 2001).

**Disipación por Rompimiento en Aguas Profundas y Forzamiento del Viento:** En aguas profundas son importantes las interacciones ola-océano-ola. En Aguas someras, es muy importante la interacción ola-corriente-lecho marino. El viento introduce energía al oleaje, haciéndolo crecer hasta el punto en el que se desestabiliza disipando gran parte



de su energía. Al viento también se le debe el nacimiento del oleaje. En CMS-WAVE la generación debida al viento hace parte de los términos “fuente” localizados al lado derecho de la ecuación de balance. El suministro del viento es calculado por el modelo mediante la siguiente ecuación que depende del Viento ( $W$ ), del ángulo de ataque del viento ( $W$ ), del ángulo de propagación del oleaje ( $\theta_{wind}$ ), y de la celeridad del grupo de olas:

$$S_{in} = \frac{a_1 \sigma}{g} F_1(\vec{W} - \vec{C}_g) F_2\left(\frac{C_g}{W}\right) E_{PM}(\sigma) \phi(\theta) + \frac{a_2 \sigma^2}{g} F_1(\vec{W} - \vec{C}_g) F_2\left(\frac{C_g}{W}\right) F_3\left(\frac{C_g}{W}\right) N$$

Donde:

$$F_1(\vec{W} - \vec{C}_g) = \begin{cases} W \cos(\theta_{wind} - C_g), & \text{si } C_g < W \\ 0, & \text{si } C_g \geq W \end{cases}$$

$$F_2\left(\frac{C_g}{W}\right) = \begin{cases} \left(\frac{C_g}{W}\right)^{1.15}, & \text{si } C_g < W \\ 1, & \text{si } C_g \geq W \end{cases}$$

$$F_3\left(\frac{C_g}{W}\right) = \begin{cases} \log_{10}\left[\left(\frac{C_g}{W}\right)^{-1}\right], & \text{si } C_g < W \\ 0, & \text{si } C_g \geq W \end{cases}$$

$$\gamma \quad E^*_{PM}(\sigma) = \frac{g^2}{\sigma^5} \exp\left(-0.74 \frac{\sigma_0^4}{\sigma^4}\right)$$

En la ecuación anterior  $E^*_{PM}(\sigma)$  representa la forma del espectro de Pierson-Moskowitz (PM) y  $\sigma_0 = g/W$  / que representa la constante de Phillips, y

$$\phi(\theta) = \frac{8}{3\pi} \cos^4(\theta - \theta_{wind}) \text{ para } |\theta - \theta_{wind}| < \frac{\pi}{2}$$

La función  $F_1$  representa el efecto del esfuerzo del viento sobre la superficie, designa el mecanismo de Phillips (Phillips, 1957), y  $F_3$  cuantifica el efecto de la edad de la ola.

Por otro lado la disipación de energía  $S_{ds}$  por rompimiento en aguas profundas incluye fenómenos de turbulencia viscosa y corriente expresados por la siguiente ecuación:

$$S_{ds} = -C_{ds}(a_e \cdot K)^{1.5} \frac{\sigma^2}{g} C_g(\sigma, \theta) F_4(\vec{W}, \vec{U}, \vec{C}_g) F_5(k \cdot h) N$$

Donde:

$$F_4(\vec{W}, \vec{U}, \vec{C}_g) = \frac{v+W}{|\vec{W}+\vec{U}+\vec{C}_g|}$$

Y

$$F_5(kh) = \frac{1}{\tanh kh}$$

Donde  $C_{ds}$  es un coeficiente de proporcionalidad, y  $v$  es un factor relacionado con la disipación por turbulencia viscosa. La amplitud de la onda  $a_e = \sqrt{E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}$  es calculada en cada celda de la grilla.

$$S_{ds} = -C_f \frac{\sigma^2}{g} \frac{\langle u_b \rangle}{\sinh^2 kh}$$

Con,

$$\langle u_b \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{h} E_{total}}$$

Donde  $\langle u_b \rangle$  representa la media horizontal de la velocidad orbital del oleaje en el lecho marino,  $E_{total}$  es la densidad de energía total en cada grilla y  $C_f$  es el coeficiente de fricción de Darcy-Weibach para un factor de fricción  $f_{dw}$ .

Valores típicos de  $C_f$  se encuentran entre 0.004 y 0.007, los cuales fueron medidos en el experimento JONSWAP realizado en los países nórdicos.

**Wave Run-up:** El run-up está compuesto por el sobre-elevación (conocido como setup) del nivel de agua, por efecto de los tensores de radiación generados por el oleaje. Las sobre elevaciones se calculan mediante las siguientes ecuaciones derivadas de las

ecuaciones de momentum horizontal, que desprecian la corriente, los esfuerzos de fondo y el rozamiento con el viento.

$$\frac{\partial n}{\partial x} = -\frac{1}{\rho gh} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial n}{\partial y} = -\frac{1}{\rho gh} \left( \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del agua de mar,  $\partial S_{xy}$ ,  $\partial S_{yy}$ ,  $\partial S_{xx}$  son las componentes de los tensores de radiación o de exceso de momentum causado por el oleaje.

#### **2.4.4.3. Caracterización del oleaje frente a la costa.**

##### **- Mallas de cálculo**

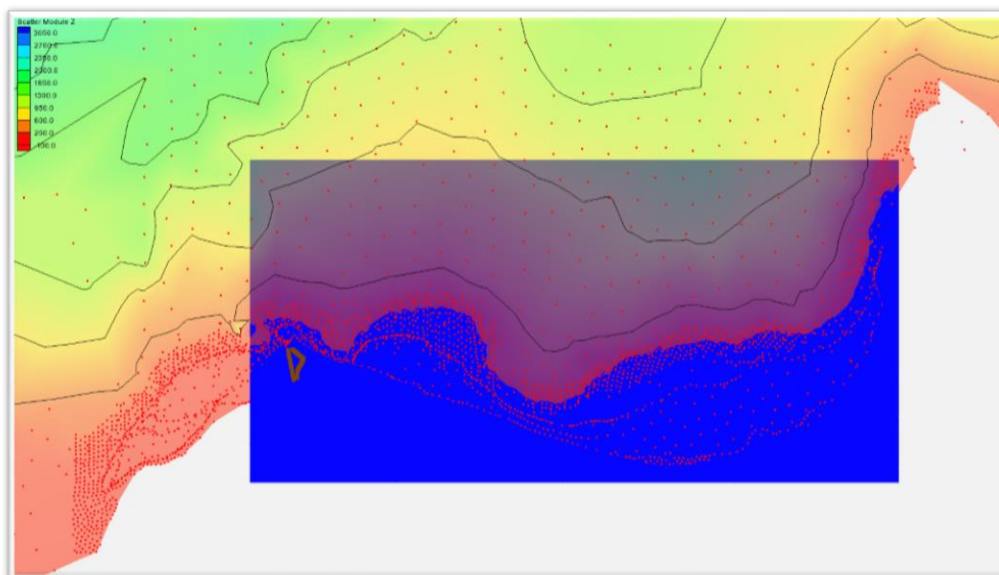
Se ha definido un conjunto dos (2) tipos de mallas computacionales distintas para poder considerar la totalidad de direcciones a modelar del oleaje incidente. Por la dimensión del área de estudio desde Bocas de Cenizas hasta el punto duro donde está la ciudad de Santa Marta, se creó una malla de detalle en este sector con celdas de 30 x 30 metros anidada a otra de mayor tamaño desde aguas más profundas para disminuir los tiempos de cálculo computacional. La tabla 3, muestra las características de las mallas.

Tabla 2-8. Características de las mallas de cálculo.

Dirección Oleaje Incidente	Malla	Origen		Rumbo (ángulo)	Dimensiones		Espaciado		No. De Filas	No. De Columnas
		X	y		X	y	x	y		
NE (ENE, NE, NNE y N) y NW (NNW, NW y WNW).	General	490900	1279800	270°	72788	99420	500	500	146	199
	Detalle	511850	1248540	270°	36310	73230	30	30	1211	2441
W, WSW y SW.	SW General	463170	1217790	336°	114052	80208	500	500	229	161
	SW Detalle	507352	1225449	336°	727457	39485	30	30	72745	39485

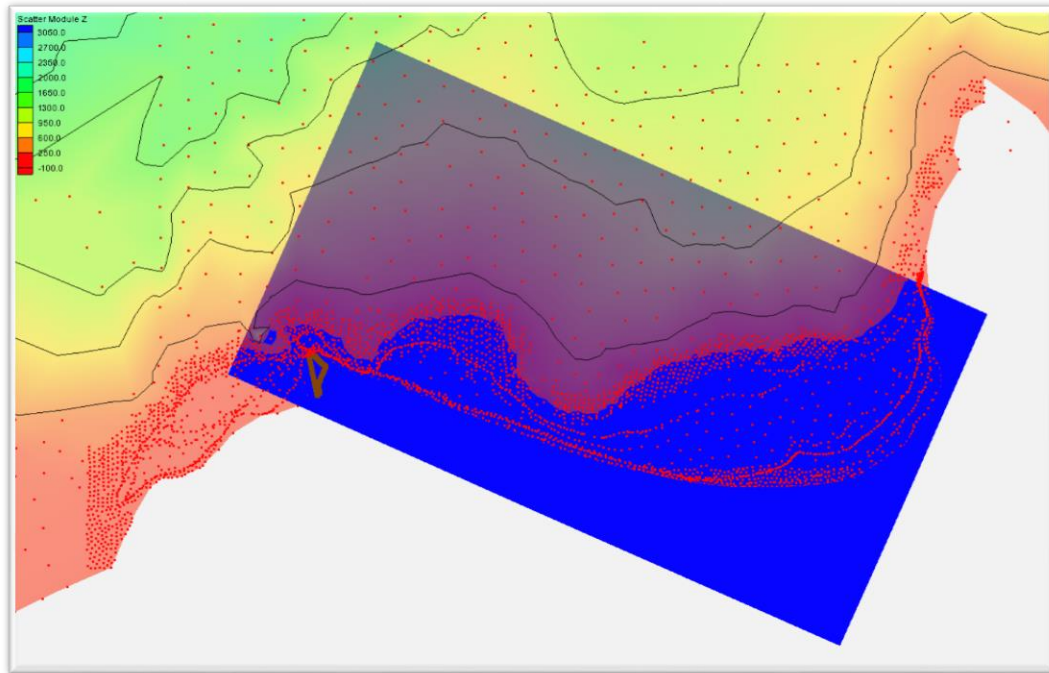
La Figura 2-46, muestra la malla de detalle tipo NE y NW para los oleajes de los sectores ENE, NE, NNE y N, así como NNW, NW y WNW.

Figura 2-46. Marco de malla general para los oleajes de los sectores NE (ENE, NE, NNE y N) y NW (NNW, NW y WNW).



Fuente: Propia.

La figura 2-47 muestra la malla de detalle tipo SW (Para los oleajes de los sectores W, WSW y SW)

**Figura 2-47. Marco de malla tipo SW para los oleajes de los sectores W, WSW y SW.**

*Fuente: Propia.*

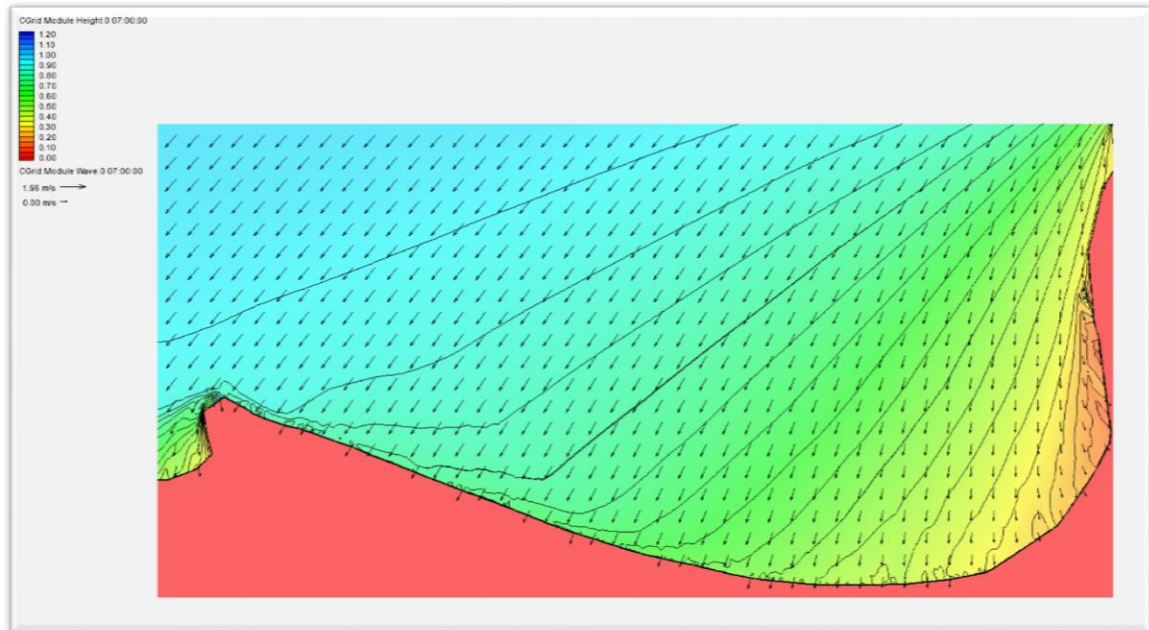
La tabla 2-9, recoge las características de los 32 oleajes simulados, que constituyen la base de interpolación bi-lineal sobre la que se definirá la propagación de toda la serie completa de oleajes registrados.

**Tabla 2-9. Características de los oleajes simulados en la propagación.**

Sector	Dirección (°N)	Hs (m)	Periodo (s)
N	0	1	5, 8, 10
NNE	22.5	1	5, 8, 10
NE	45	1	5, 8, 10, 12
ENE	67.5	1	5, 8, 10, 12
SW	225	1	4, 6, 8
WSW	247.5	1	4, 6, 8
WSW	270	1	4, 6, 8
WNW	292.5	1	5, 8, 10
NW	315	1	5, 8, 10
NNW	337.5	1	5, 8, 10

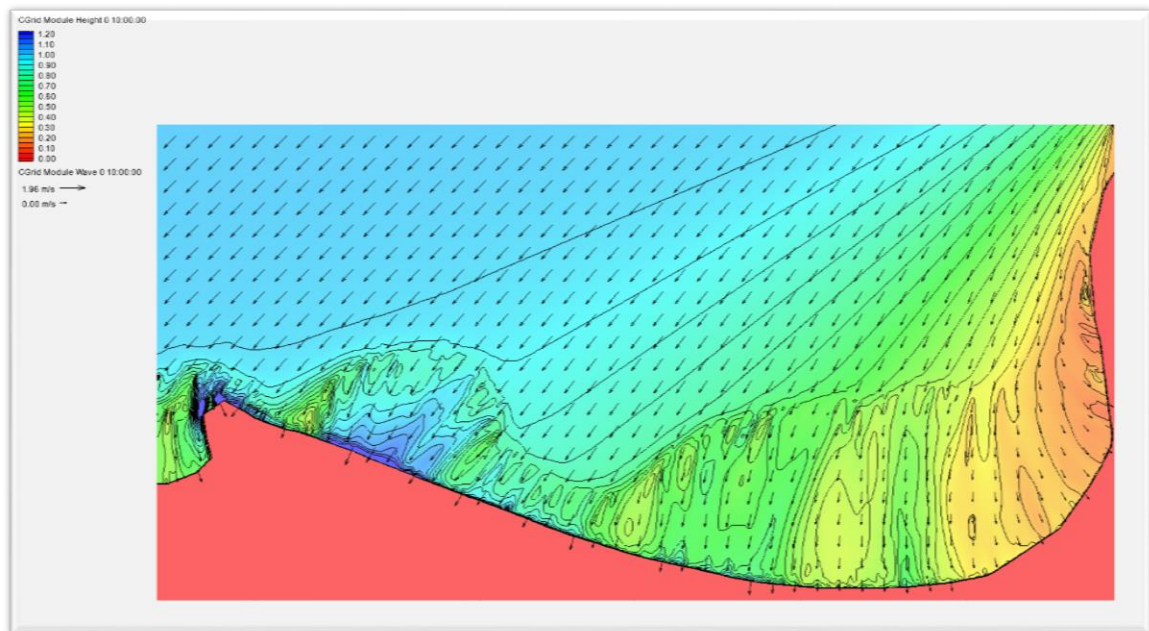
Los oleajes seleccionados para formar la base de interpolación bi-lineal se han definido teniendo en cuenta la frecuencia relativa de presentación por sectores, la caracterización de los períodos llevada a cabo para cada uno de ellos y la certidumbre en que el comportamiento en altura de ola se puede tratar como fuera de la zona de rompientes. Se presentan a título ilustrativo, resultados gráficos de algunas de las simulaciones realizadas, que muestran la distribución del coeficiente adimensional de propagación ( $K_p = H_s/H_{so}$ ) junto con las direcciones medias del oleaje obtenidas. La Figura 2-48 a Figura 2-49, recogen los resultados gráficos de todas las simulaciones realizadas.

**Figura 2-48.** Distribución del coeficiente adimensional de propagación  $K_p=H_s/H_{s,o}$  y del ángulo medio de incidencia. Oleaje sector NE.  $H_{s,o}=1,0$  m.  $T_p=5$  s



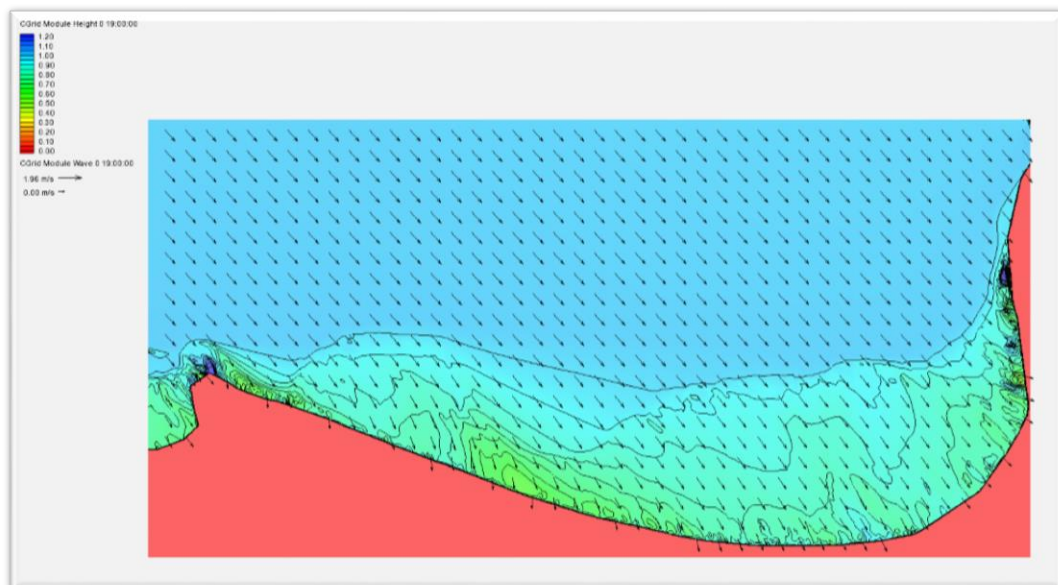
*Fuente: Propia.*

**Figura 2-49.** Distribución del coeficiente adimensional de propagación  $K_p=H_s/H_{s,o}$  y del ángulo medio de incidencia. Oleaje sector NE.  $H_{s,o}=1,0$  m.  $T_p=12$  s.



*Fuente: Propia.*

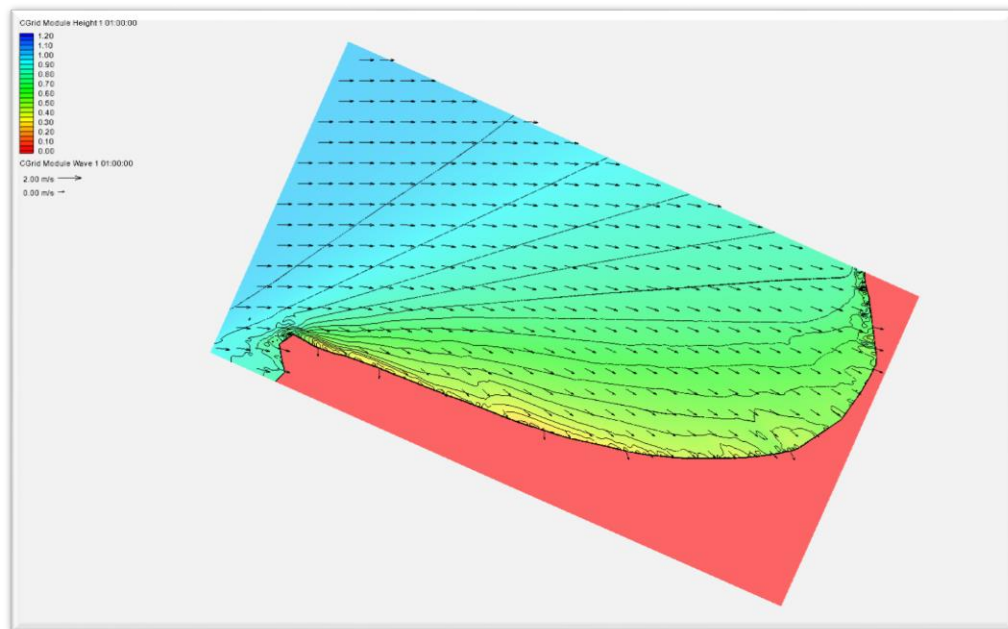
**Figura 2-50.** Distribución del coeficiente adimensional de propagación  $K_p=H_s/H_{s,o}$  y del ángulo medio de incidencia. Oleaje NW.  $H_{s,o}=1,0$  m.  $T_p=8$  s.



*Fuente: Propia.*

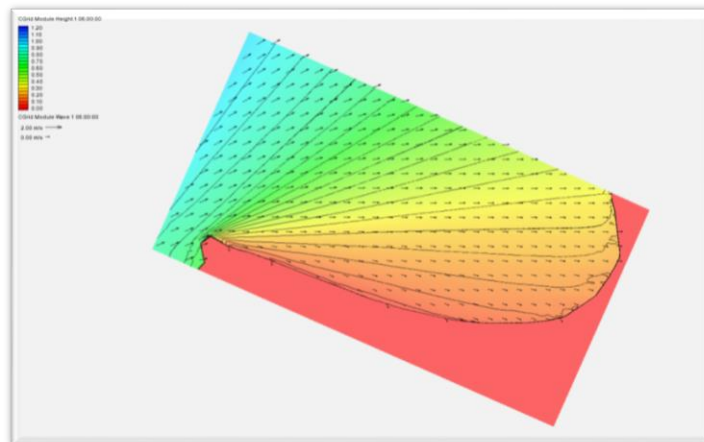


**Figura 2-51.** Distribución del coeficiente adimensional de propagación  $K_p=H_s/H_{s,o}$  y del ángulo medio de incidencia. Oleaje W  $H_{s,o}= 1,0$  m.  $T_p= 6$  s.



*Fuente: Propia.*

**Figura 2-52.** Distribución del coeficiente adimensional de propagación  $K_p=H_s/H_{s,o}$  y del ángulo medio de incidencia. Oleaje SW  $H_{s,o}= 1,0$  m.  $T_p= 4$  s.



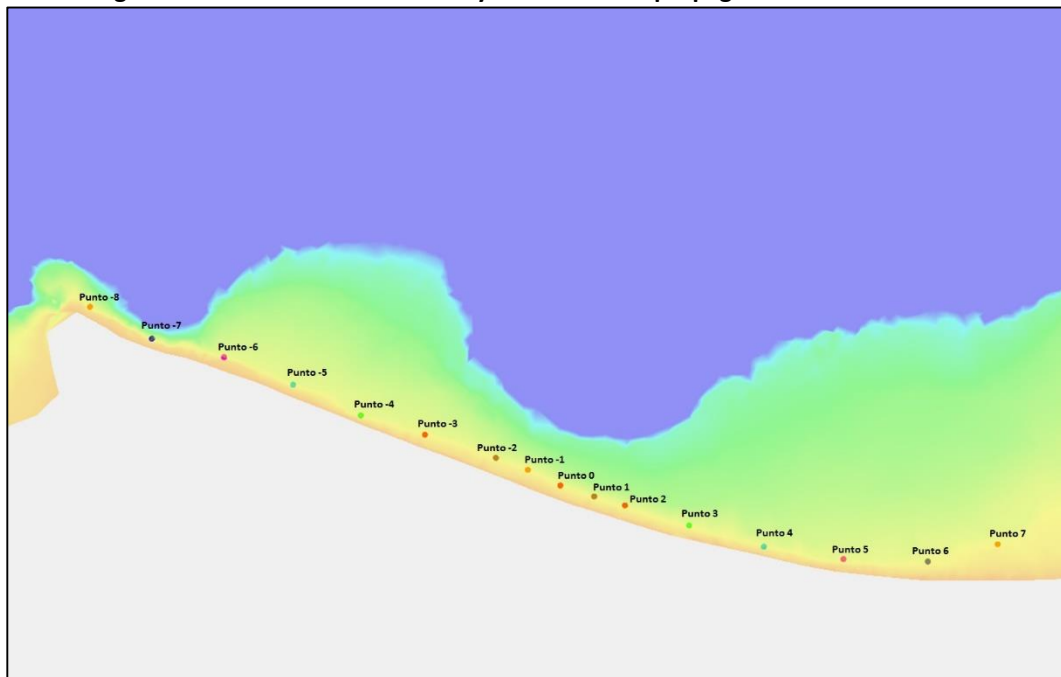
*Fuente: Propia.*

#### 2.4.4.4. Caracterización del oleaje frente a la costa.

Para poder definir estadísticamente el oleaje frente a la costa de la zona de estudio, se han obtenido las series temporales en boyas virtuales seleccionadas a partir de los registros del oleaje en aguas profundas y una interpolación bi-lineal de los parámetros de propagación del oleaje obtenidos con el modelo numérico.

Los puntos seleccionados frente a la costa fueron ubicados a distancia del orden de 5.0 km cada uno, con inicio en el sitio de referencia del KM-19, de la vía (Ruta 90). En cada punto se determinará la característica del oleaje. Ver Figura 2-53

**Figura 2-53. Localización de las boyas virtuales de propagación frente a la obra.**

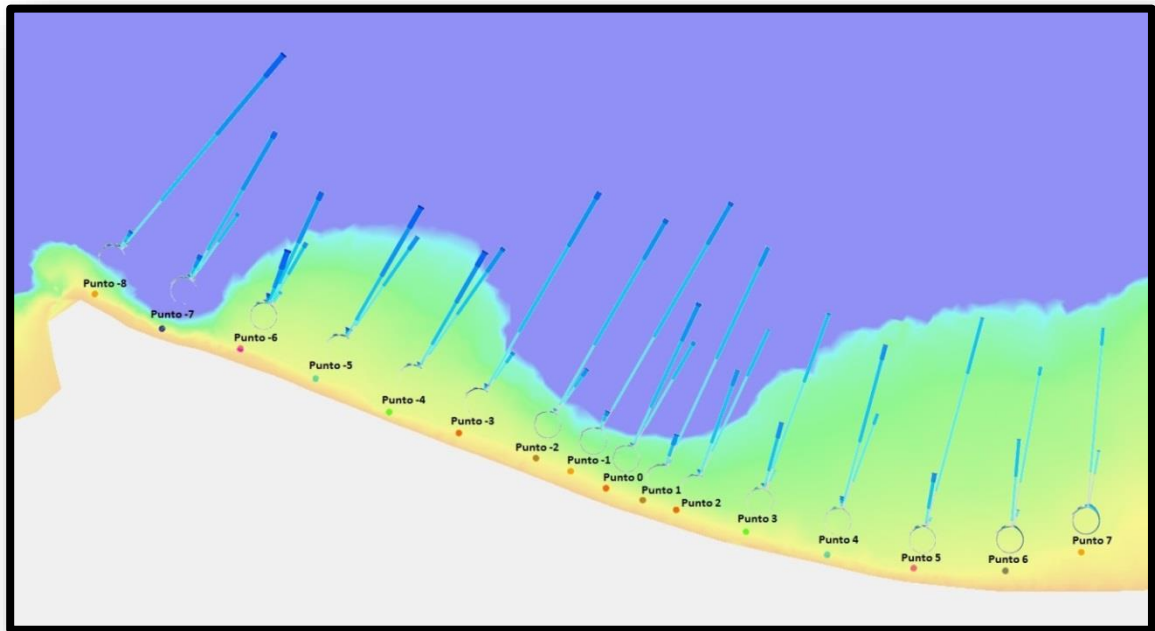


*Fuente: Propia.*

► Rosas de oleaje.

La Figura 2-54, muestra las características del oleaje en cada boya virtual, representada por su rosa de oleaje y tabla de presentación sectorial.

**Figura 2-54.** Distribución de las rosas de oleaje a lo largo de la costa (a una profundidad de 8 m).



Fuente: Propia.

► Régimen medio.

El régimen medio de cualquier variable ambiental relaciona los diversos niveles de la misma con la probabilidad de que dichos niveles no sean superados en un periodo de tiempo igual a un año medio.

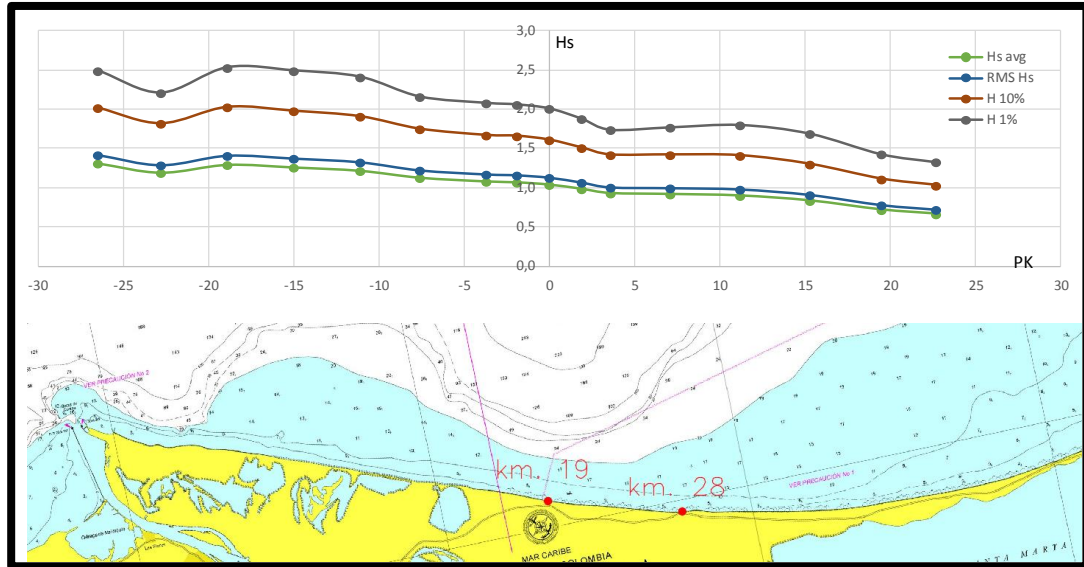
Se denomina régimen medio escalar a la función de distribución estadística que define el porcentaje de tiempo que, en el año medio, la variable no excede un determinado valor.

El procedimiento más habitual, por su sencillez, es determinar la probabilidad de no excedencia de un determinado nivel de velocidad media de viento a partir de los datos muestrales. Careciendo de interés en este caso el ajuste de una función de distribución. La Figura 2-55 y Tabla 2-10; presenta la caracterización del oleaje en cada una de las

boyas, se incluye el oleaje medio y los oleajes para probabilidades del 10 y 1 %, así como la altura media cuadrática.

Se presenta la distribución tabulada, para cada una de las boyas virtuales definidas:

**Figura 2-55. Variación de los parámetros estadísticos del oleaje a lo largo de la costa.**



Fuente: Propia.

**Tabla 2-10. Variación de los oleajes a lo largo de la costa.**

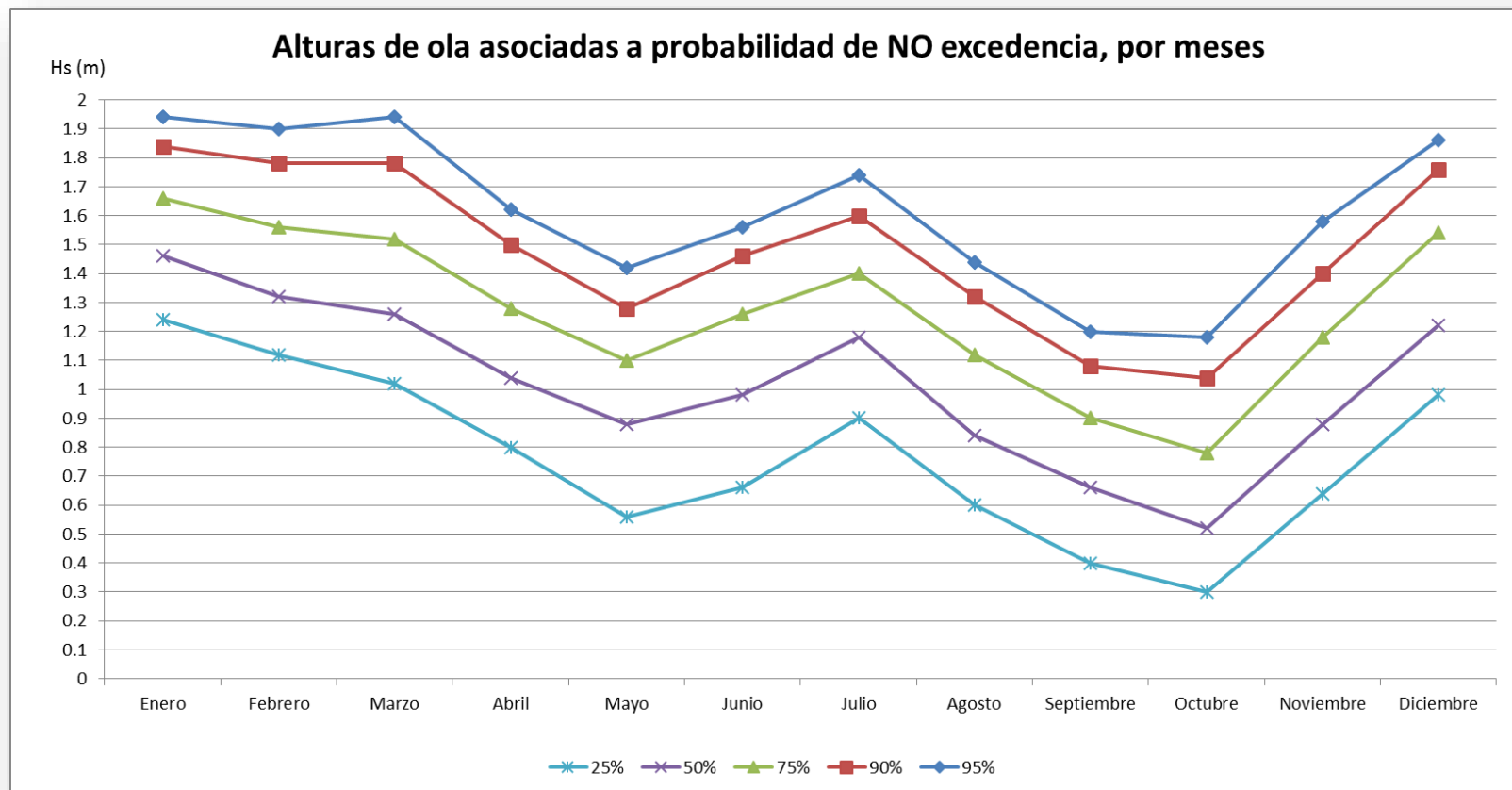
Punto	Hs avg	RMS Hs	H 10%	H 1%	H 0.137%
-7	1.19	1.29	1.82	2.21	2.50
-6	1.29	1.41	2.03	2.53	2.94
-5	1.26	1.37	1.98	2.49	2.95
-4	1.22	1.33	1.91	2.41	2.83
-3	1.13	1.22	1.75	2.16	2.47
-2	1.08	1.17	1.67	2.08	2.40
-1	1.07	1.16	1.66	2.06	2.38
0	1.04	1.13	1.61	2.01	2.33
1	0.99	1.07	1.51	1.88	2.18
2	0.93	1.01	1.42	1.74	2.02
3	0.92	1.00	1.42	1.77	2.05
4	0.90	0.98	1.41	1.80	2.12
5	0.84	0.91	1.30	1.69	2.03
6	0.72	0.78	1.11	1.43	1.73
7	0.67	0.72	1.03	1.33	1.62

La Tabla 2-11 y Figura 2-56, muestra los umbrales de altura de ola significativa asociada a probabilidades de no excedencia para cada mes, una boya de referencia tipo ubicada en el sector de KM-19.

**Tabla 2-11. Umbrales de altura de ola significativa asociados a probabilidad de no excedencia, para cada mes. Sector KM-19.**

Probabilidad de no excedencia	Altura de ola significativa Hs (m) - Boya virtual C - K19											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic.
10%	1	0.96	0.8	0.6	0.32	0.42	0.64	0.4	0.26	0.14	0.46	0.76
20%	1.16	1.08	0.96	0.76	0.48	0.6	0.82	0.54	0.36	0.26	0.6	0.92
25%	1.24	1.12	1.02	0.8	0.56	0.66	0.9	0.6	0.4	0.3	0.64	0.98
30%	1.3	1.18	1.06	0.86	0.62	0.74	0.98	0.66	0.44	0.34	0.68	1.04
40%	1.38	1.26	1.18	0.96	0.76	0.88	1.08	0.74	0.54	0.44	0.78	1.14
50%	1.46	1.32	1.26	1.04	0.88	0.98	1.18	0.84	0.66	0.52	0.88	1.22
60%	1.54	1.4	1.36	1.14	0.96	1.08	1.26	0.94	0.76	0.6	1	1.34
70%	1.62	1.5	1.46	1.24	1.04	1.2	1.36	1.04	0.86	0.72	1.12	1.48
75%	1.66	1.56	1.52	1.28	1.1	1.26	1.4	1.12	0.9	0.78	1.18	1.54
80%	1.7	1.62	1.6	1.34	1.14	1.32	1.46	1.18	0.94	0.86	1.22	1.62
85%	1.76	1.7	1.68	1.4	1.2	1.4	1.52	1.26	1	0.94	1.3	1.68
90%	1.84	1.78	1.78	1.5	1.28	1.46	1.6	1.32	1.08	1.04	1.4	1.76
95%	1.94	1.9	1.94	1.62	1.42	1.56	1.74	1.44	1.2	1.18	1.58	1.86
98%	2.06	2	2.18	1.8	1.54	1.66	1.86	1.58	1.34	1.36	1.74	2.04
99%	2.18	2.06	2.32	1.9	1.64	1.74	1.94	1.68	1.46	1.56	1.84	2.12

Figura 2-56. Régimen medio de la altura de ola, por meses. (Sector KM-19).



Fuente: Propia.

► Régimen extremal

Metodología de análisis extremal:

Para el cálculo del régimen extremal direccional, es preciso disponer de una serie de datos suficientemente extensa para garantizar que la muestra de extremos comprenda sucesos poco frecuentes, es decir sucesos extraordinarios. En ese sentido se consideran los datos disponibles, completando un total de 9 años, que es suficientemente largo como para realizar un análisis extremal para los periodos de retorno de interés en el presente proyecto.

Se denomina régimen extremal a la función de distribución de los valores extremos de una determinada variable. Dicha función expresa la probabilidad de que un valor dado no sea superado en un periodo de tiempo prefijado.

La estadística clásica, que trata las propiedades de los datos dispersos alrededor de su media muestral, resulta de poca utilidad cuando lo que se desea conocer es el comportamiento de valores suficientemente alejados de ella. El estudio de un fenómeno en sus condiciones extremas requiere el uso de métodos estadísticos específicamente diseñados para tal fin, como es en este caso el análisis extremal.

Los métodos actualmente más utilizados en el análisis extremal del oleaje pueden clasificarse en dos grupos generales, atendiendo a la información que manejan:

1. Método de la distribución inicial (o muestra total); basado en el análisis de la cola superior del régimen medio, definido a su vez con el conjunto total de datos muestrales. Este método es recomendable cuando la duración del registro disponible es corta puesto que utiliza toda la información registrada a intervalos regulares durante un periodo de tiempo dado.
2. Método de los valores extremos (o muestra selectiva), basado en el análisis de los valores extremos del registro, e.g. temporales. La selección de la muestra puede hacerse por cualquiera de los siguientes métodos:
  - Método de máximos anuales: la muestra consta de los valores máximos de la variable de estudio en determinados periodos de tiempo prefijados, habitualmente años o inviernos marítimos. Este método no es recomendable cuando: (i) la duración del registro es corta, por disponer de una muestra reducida; (ii) existen importantes huecos en el registro continuo de la variable de estudio, dado que no se puede garantizar que el suceso máximo anual se haya registrado.



- Método de los valores de pico o del umbral (Peak Over Threshold - POT): la muestra se determina a partir de los valores extremos (independientes entre sí) que superan un determinado umbral prefijado. El valor definido para dicho umbral permite controlar las dimensiones de la muestra con la cual se llevará a cabo el análisis extremal.

El método utilizado en el presente estudio es el de los valores de pico o POT. Además se estudian los datos ya propagados al emplazamiento de interés y todos ellos agrupados.

Si definimos  $F(H_s)$  como la probabilidad de que el valor de la variable altura de ola significativa  $H_s$  no sea excedida en el periodo de tiempo 1 el periodo medio de retorno  $T$  asociado al valor  $H_s$  se determina a partir de la siguiente relación:

$$T = \frac{1}{\lambda [1 - F(H_s)]}$$

Las funciones de distribución comúnmente empleadas para caracterizar el régimen extremal de la variable  $H_s$  son las siguientes:

Gumbel o Asíntota-I o FT-I (con los parámetros  $A$  de posición y  $B$  de escala)

$$F(H_s) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{H_s - A}{B} \right) \right]$$

Weibull (con los parámetros  $A$  de posición,  $B$  de escala y  $C$  de forma)

$$P(H_s < x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x - A}{B} \right)^C \right]$$

Los métodos habitualmente empleados para estimar el valor de los parámetros de la función de distribución son, como para el caso de los regímenes medios, el método de los momentos (MM), el de máxima verosimilitud (MV) y el de mínimos cuadrados (MC). De acuerdo al teorema de Rao, el método de máxima verosimilitud (MV) es el que presenta menor varianza (o dispersión) de la muestra respecto a la estima central dada por la función de distribución ajustada, por lo que se considera el mejor método de ajuste desde el punto de vista estadístico.

Sin embargo, cuando la muestra analizada no se ajusta bien a la función de distribución considerada, o ante la presencia de “outliers” es preferible considerar el método de mínimos cuadrados (MC) debido a la inestabilidad del método MV, que se refleja en la existencia de una banda de confianza de mayor amplitud.

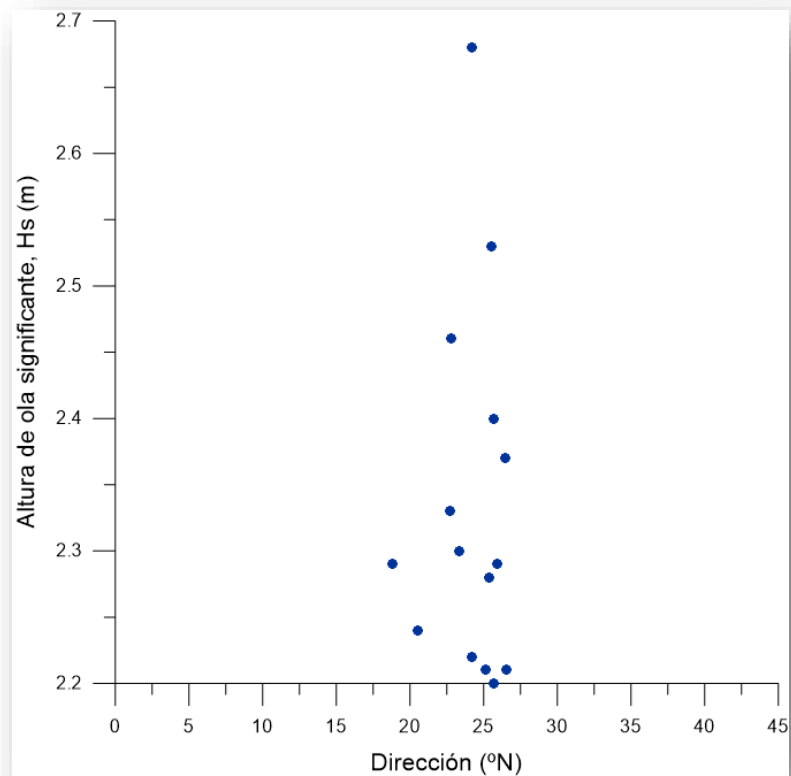
Previamente al ajuste de los datos muestrales a las funciones de distribución dadas se procede a realizar el contraste o test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) con un nivel de

significación del 10% para comprobar si la función de distribución empírica, definida por la muestra, se ajusta a la función de distribución teórica.

**Muestra de datos direccionales:**

Para analizar los oleajes más energéticos registrados que han llegado a la ubicación de interés se procede a seleccionar una muestra de temporales independientes. Son datos de la serie de oleaje propagada que presentan los mayores registros de altura de ola. Se puede comprobar cómo se agrupan en torno a una misma dirección.

**Figura 2-57. Altura de ola y dirección de temporales con alturas de ola por encima de 2,2 m.**



*Fuente: Propia*

**Resultados de análisis extremal:**

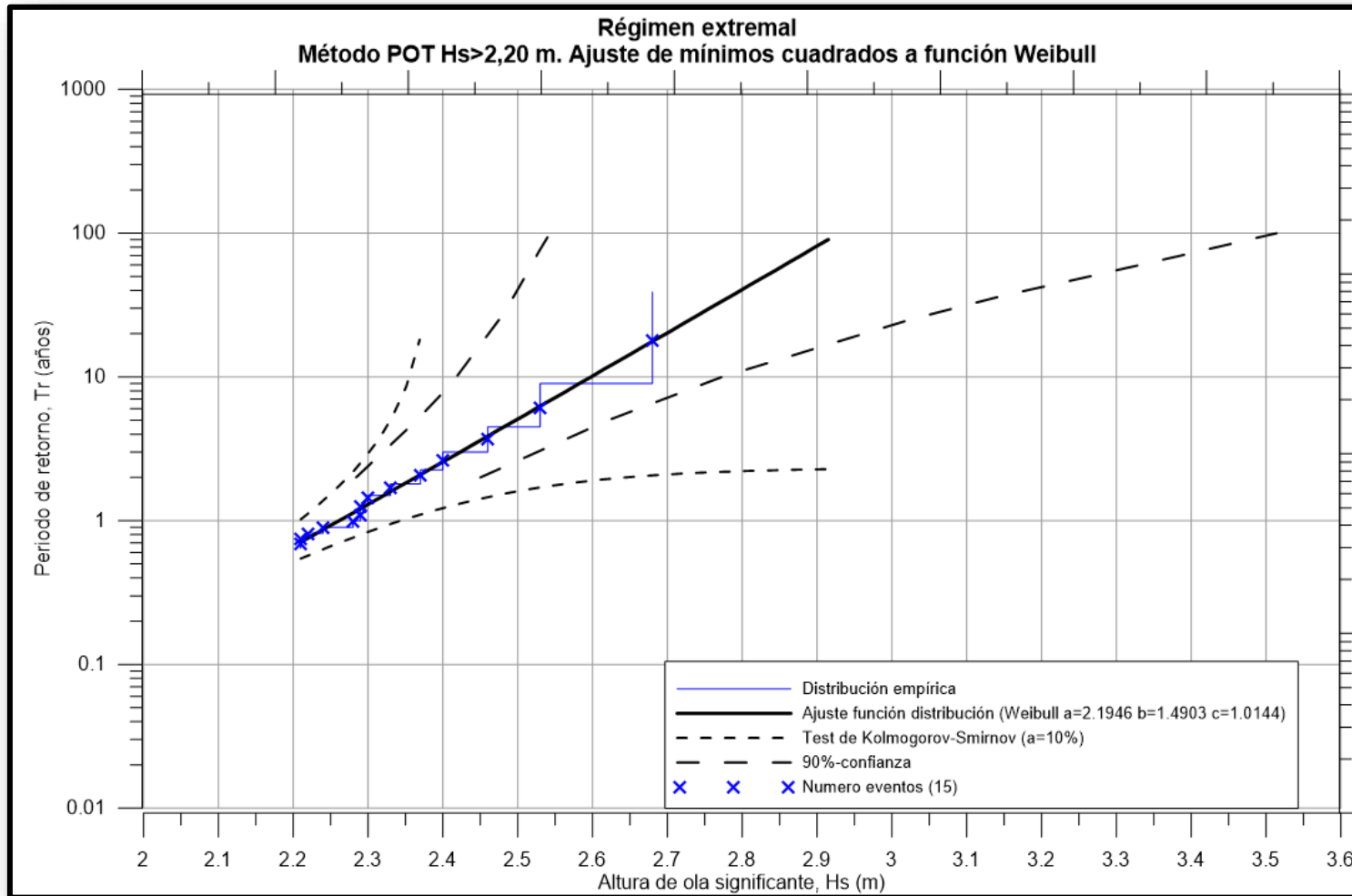
La

**Tabla 2-12** muestra los resultados del análisis extremal, mientras que los detalles del ajuste se pueden ver representados en la Figura 2-58.

**Tabla 2-12. Alturas de ola significantes correspondientes a periodos de retorno de interés.**

Periodo retorno, Tr (años)	Estima central altura de ola, Hs (m)
2	2.36
5	2.50
7.2	2.55
10	2.60
25	2.73
36.6	2.79
50	2.83
72.6	2.88
100	2.93

Figura 2-58. Régimen extremal de datos sobre umbral 2,2 m. Datos propagados a la boya 0.



Fuente: Propia.

## 2.5. ANÁLISIS DE LA DINÁMICA LITORAL

El análisis de la dinámica litoral, corresponde al cálculo de los transporte de sedimentos para definir el Balance sedimentario, insumo para valorar las tasas de erosión en la zona de estudio que servirá de base para el análisis de las alternativas a plantear como solución de ingeniería.

### 2.5.1. PROFUNDIDAD DE CIERRE.

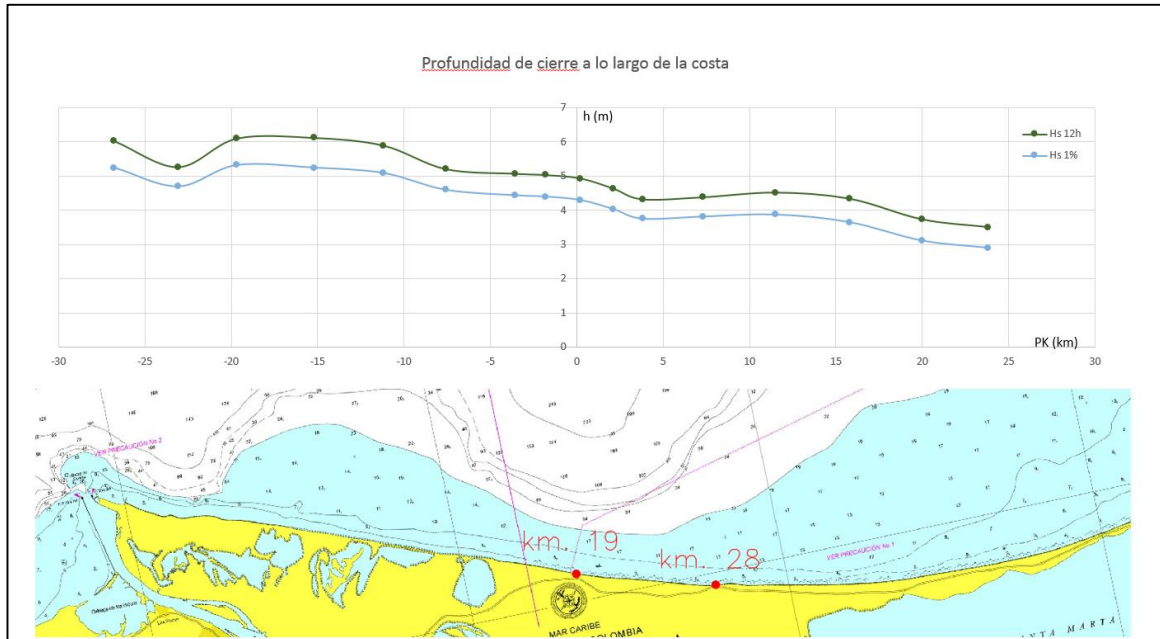
La profundidad de cierre es el límite de la zona activa del perfil de playa, definida como aquella en la cual el sedimento del fondo experimenta movimientos significativos debido a la acción del oleaje. Este parámetro se calcula a partir de la fórmula de Hallermeier (1978):

$$D_c = 2.28H_{0.136\%} - 68.5 * \left( \frac{H_{0.136\%}^2}{gT_{0.136\%}^2} \right)$$

Dónde:

- $D_c$  es la profundidad de cierre.
- $H_{0.136\%}$  es la altura de ola excedida 12h al año, determinada a partir del clima marítimo.
- $T_{0.136\%}$  es el periodo asociado a esta altura de ola.

El cálculo representativo muestra que la profundidad, varía desde 3.0 a 6 metros, con un valor medio del orden de 4.5 m. La Figura 2-59, muestra la variación de la profundidad de cierre a lo largo de la costa, incluyendo en el cálculo dos tipos de alturas de olas, con el objeto de observar si hay variabilidad representativa.

**Figura 2-59. Variación de la profundidad de cierre a lo largo de la costa.**

Fuente: Propia.

Considerando una cota superior de la berma de playa igual a +1.50 m, resulta una zona activa del perfil de playa de altura igual a 1.5. m + la profundidad de cierre calculada para cada sector.

### 2.5.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SEDIMENTOS.

La información sedimentológica con la que se cuenta hace parte de estudios recopilados en sectores puntuales a lo largo de la línea de costa entre Ciénaga y Bocas de Cenizas. Esta información es consistente y representativa para evaluar las características de los sedimentos, debido a que el sector en estudio se ubica en una misma unidad fisiográfica en la cual los sedimentos presentan características similares ya que no hay otros aportes representativos que así lo modifique.

Los datos que se relacionan corresponden a los sectores de Malecón de Ciénaga y Costa Verde en este municipio, sectores del KM55 y KM-19 en la vía (ruta 90), Barra de Bocas de Cenizas en formación y muestras sumergidas ya en la Desembocadura del río Magdalena.

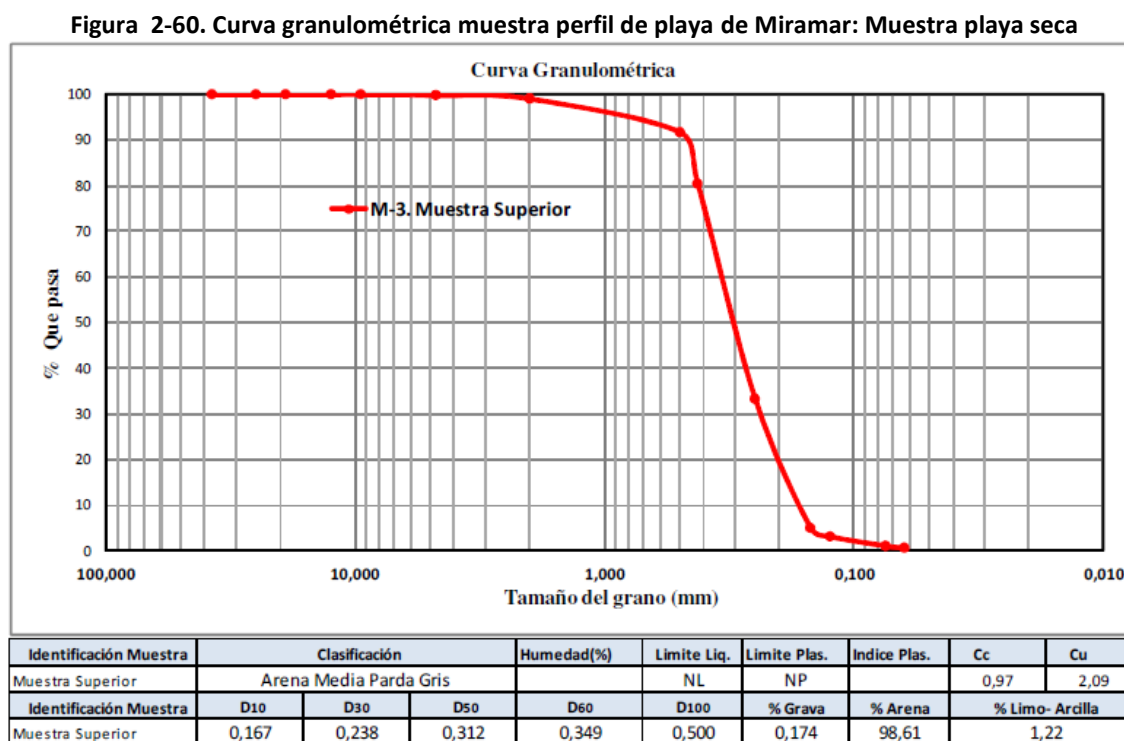
Como características general de la zona, las arenas son de color gris, con tamaños medios que varían entre 0.28 y 0.35 mm, un valor representativo que caracterice toda la zona puede ser un  $D_{50}$  de 0.3 mm.

### 2.5.2.1. Sector Malecón de Ciénaga y Costa Verde.

El muestreo sedimentológico fue realizado en agosto de 2014. Las muestra corresponden a un perfil de playa en la zona de Miramar frente al Malecón, la muestra fue tomada en la playa seca, línea de mar y playa sumergida. En la playa colmatada de los espolones de Costa Verde se tomó otra muestra para su análisis.

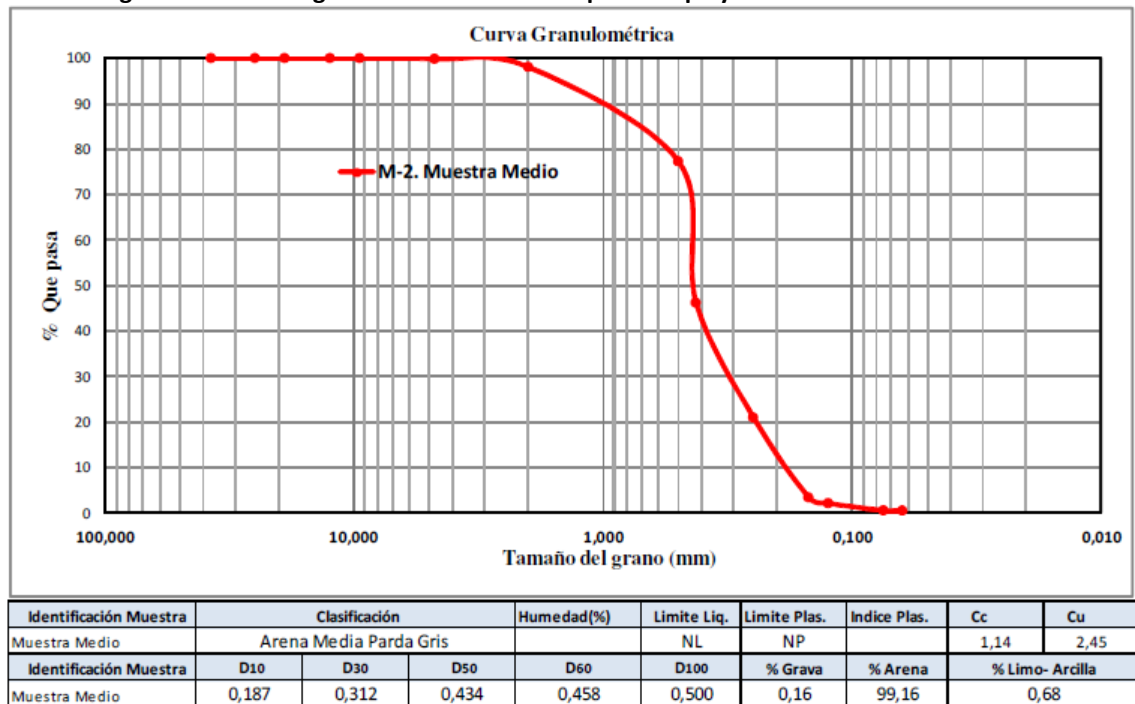
Las muestras fueron analizadas con la serie de tamices estándar, complementados con los tamices No. 35, 60, 120 y 230 para conocer su composición granulométrica.

De la Figura 2-60 a la Figura 2-63, se presentan las curvas de gradación de cada una de las muestras analizadas, los porcentajes de grava, arena, limo o arcilla, coeficientes de curvatura, coeficientes de uniformidad, clasificación de acuerdo con el sistema unificado y los diámetros característicos  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{60}$ , y  $D_{100}$ .



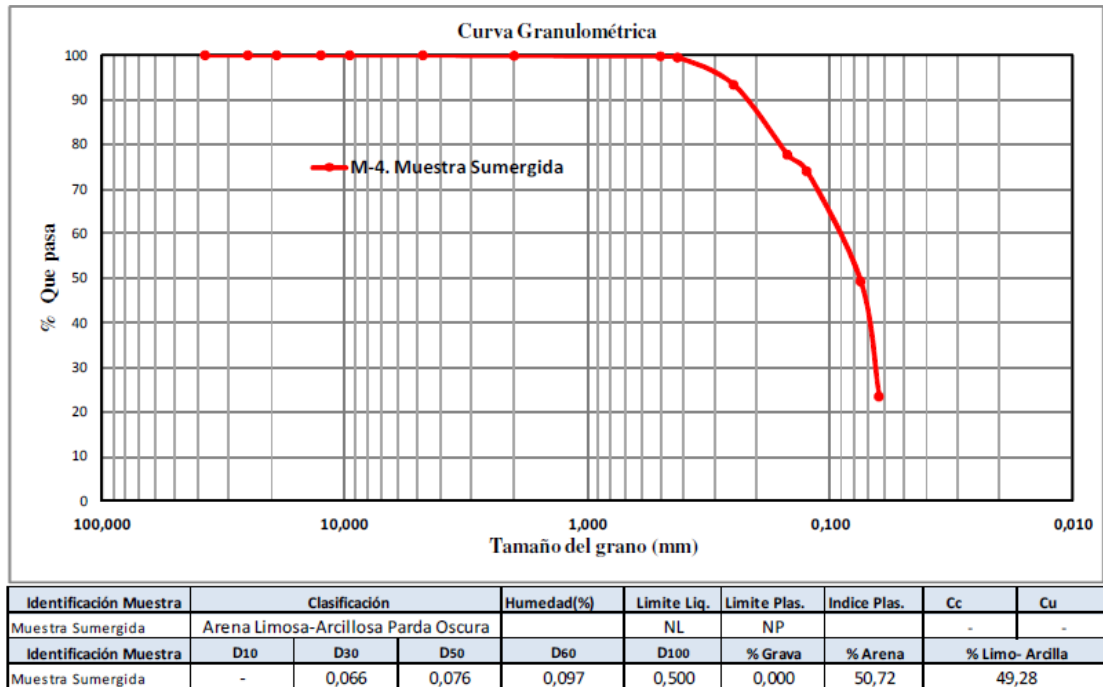
Fuente: SISCO INGENIERIA – Alcaldía de Ciénaga.

Figura 2-61. Curva granulométrica muestra perfil de playa de Miramar: Línea de mar.



Fuente: SISCO INGENIERIA – Alcaldía de Ciénaga.

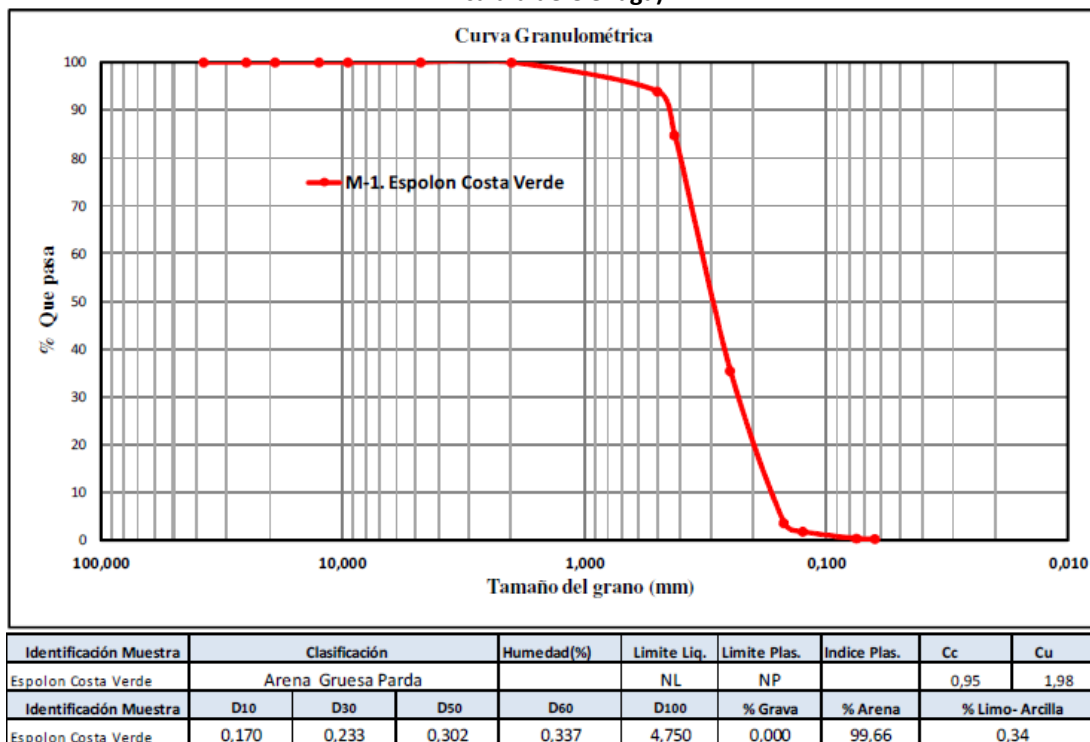
Figura 2-62. Curva granulométrica muestra perfil de playa de Miramar: Muestra Sumergida. (Fuente: SISCO INGENIERIA – Alcaldía de Ciénaga).





Fuente: SISCO INGENIERIA – Alcaldía de Ciénaga.

**Figura 2-63. Curva granulométrica muestra playa seca espolón de Costa Verde. (Fuente: SISCO INGENIERIA – Alcaldía de Ciénaga).**

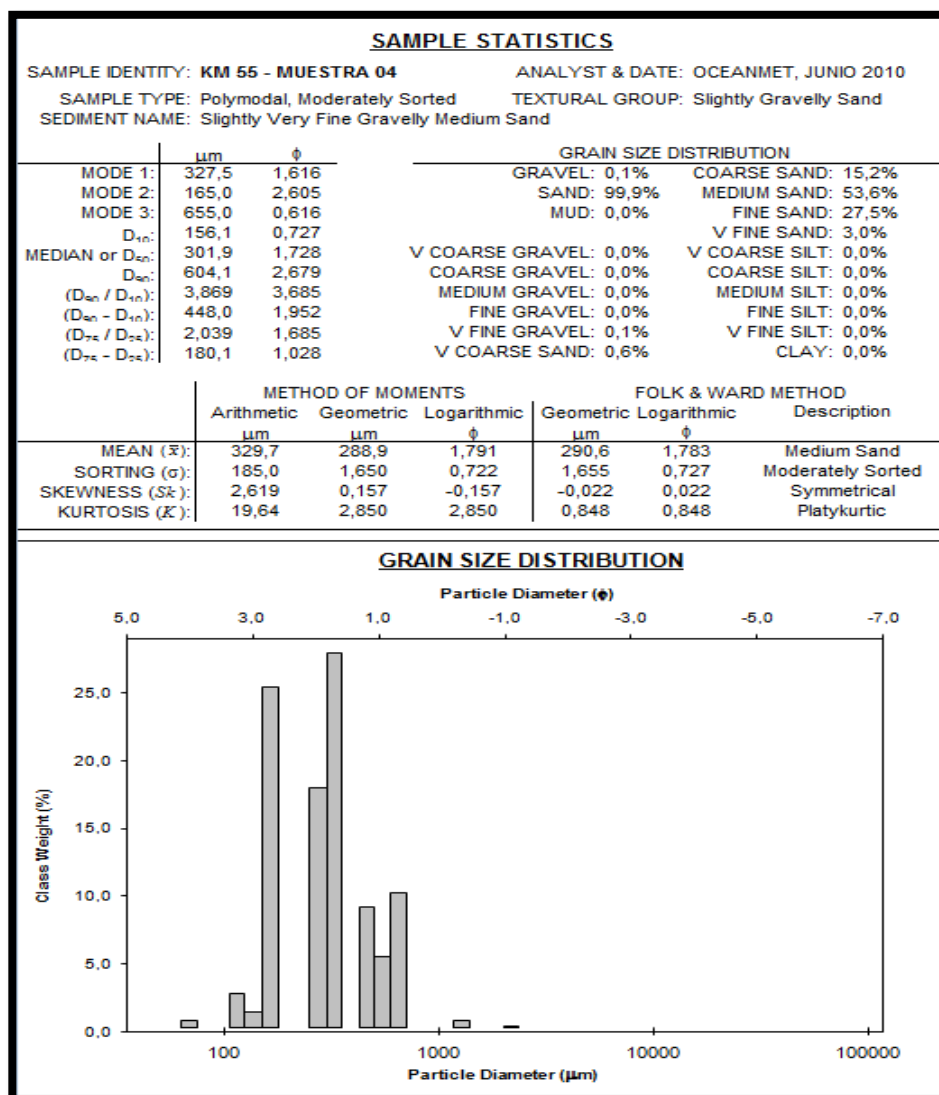


Fuente: SISCO INGENIERIA – Alcaldía de Ciénaga.

#### 2.5.2.2. Sector KM-55 en la vía – Ruta 90 (Municipio de Pueblo Viejo).

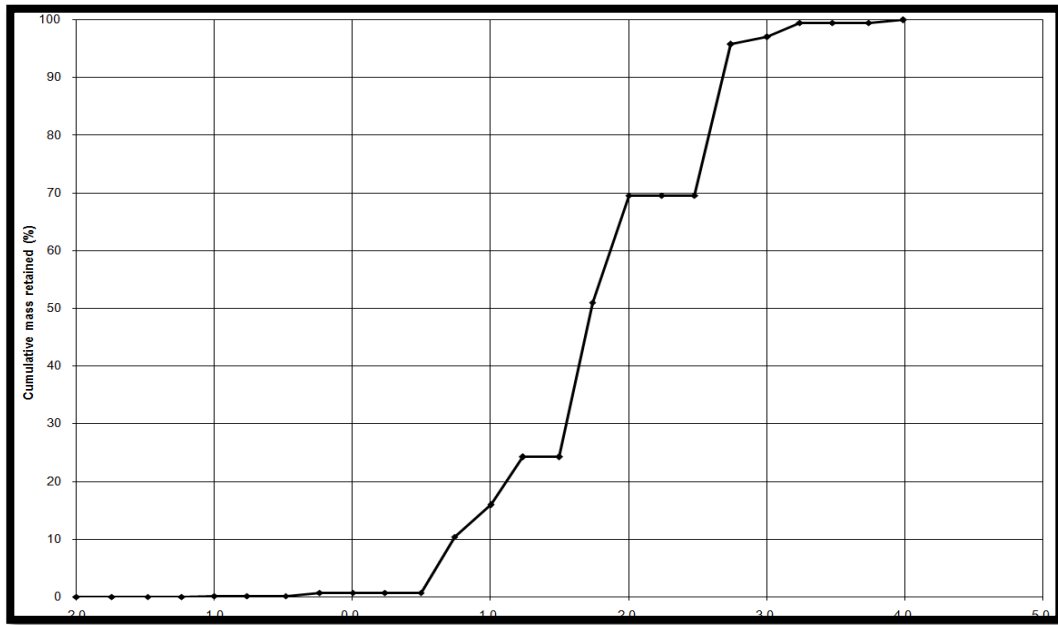
De la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a Figura 2-67, se muestran las curvas características de las características sedimentológica en este sector, tomada de estudios realizados por la Gobernación del Magdalena.

Figura 2-64. Cálculo de los estadísticos utilizando el programa GRADISTAT para la muestra sedimentología KM 55 - MUESTRA 04.



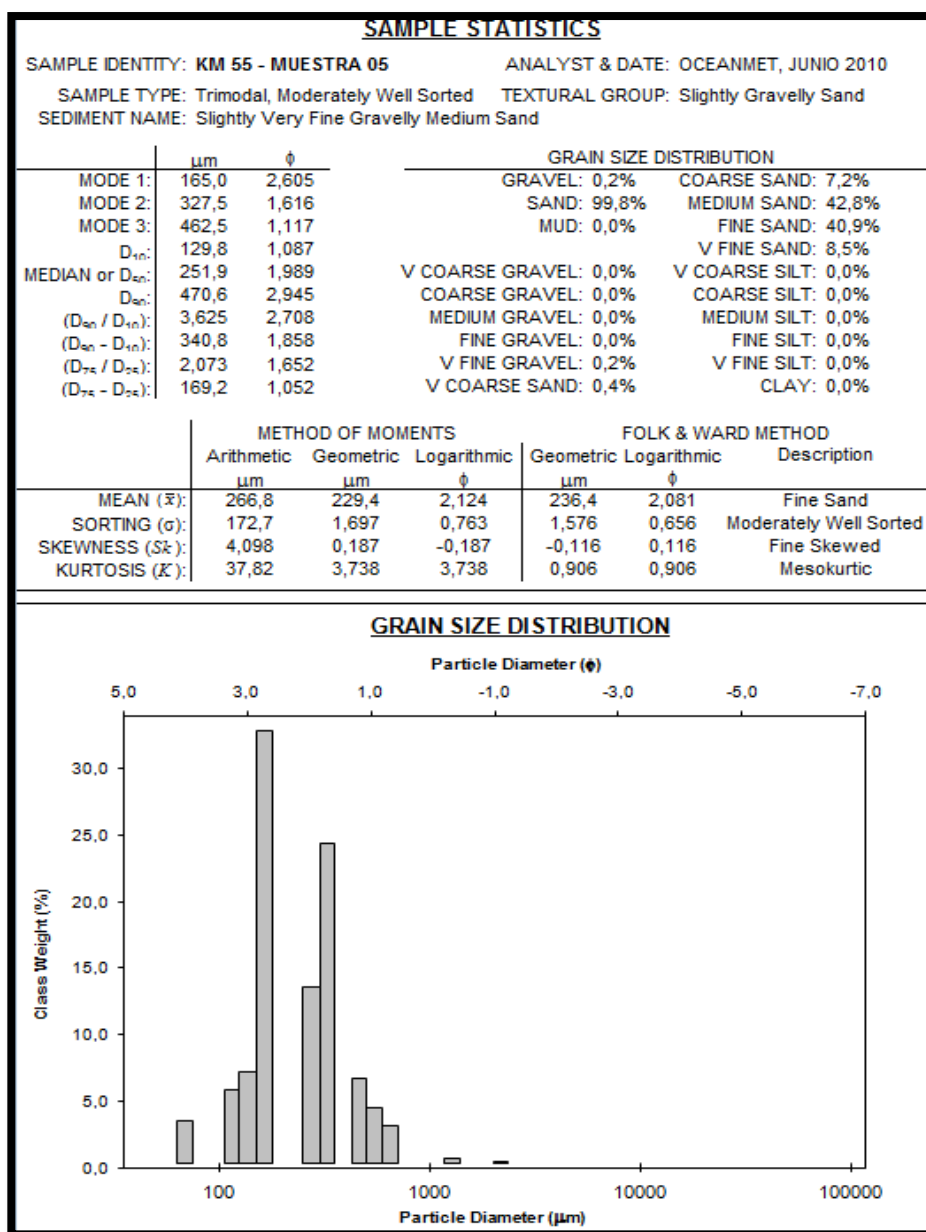
Fuente: Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-65. Curva de acumulación de la muestra KM 55 - MUESTRA 04.**

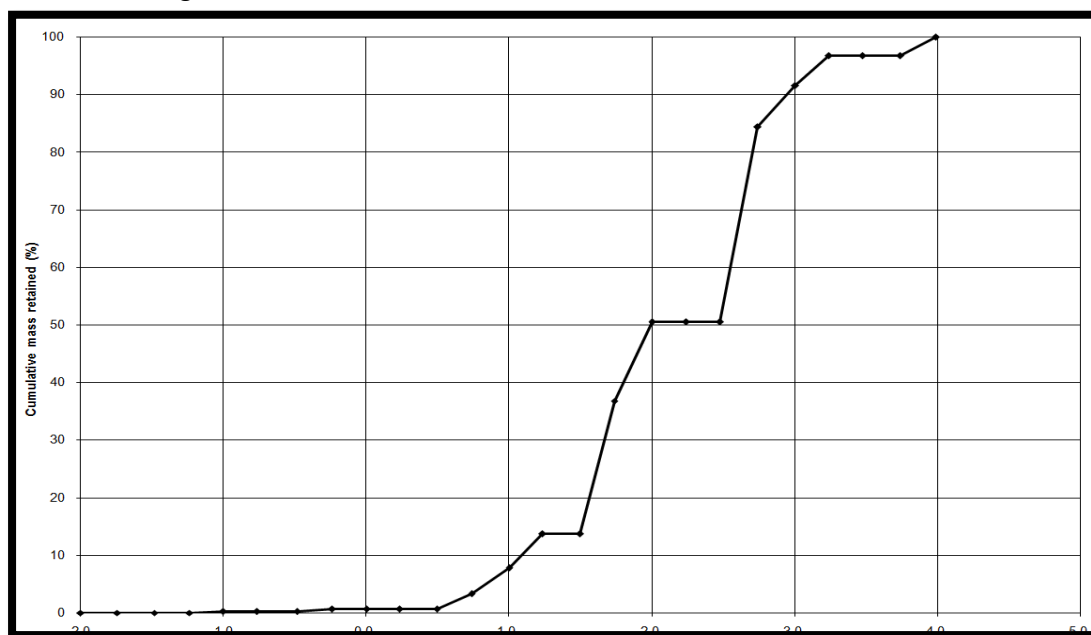


*Fuente: Gobernación del Magdalena.*

**Figura 2-66. Cálculo de los estadísticos utilizando el programa GRADISTAT para la muestra sedimentología KM 55 - MUESTRA 05.**



Fuente: Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-67. Curva de acumulación de la muestra KM 55 - MUESTRA 05.**

*Fuente: Gobernación del Magdalena.*

### 2.5.2.3. Sector del KM-19 en la vía (RUTA 90).

La muestra, para este sector corresponde a perfiles de playa en la parte seca, zona de orilla y parte sumergida, en un tramo de costa del KM-19 de hasta 4.0 km de longitud en la línea de playa.

Las muestras fueron tomadas en el perfil activo de la playa; en la zona seca, línea de orilla y zona sumergida hasta una profundidad hasta de 1.0 m. Posteriormente mediante análisis granulométrico, determinaron las curvas granulométricas con la cual se definieron los diámetros característicos de la zona de estudio.

La Figura 2-68 y la

Tabla 2-13, muestran la ubicación en planta de las muestras seleccionadas y el diámetro  $D_{50}$  resultado de cada una de ellas.

**Figura 2-68. Localización de la zona de toma de muestra de sedimentos Km 19.**

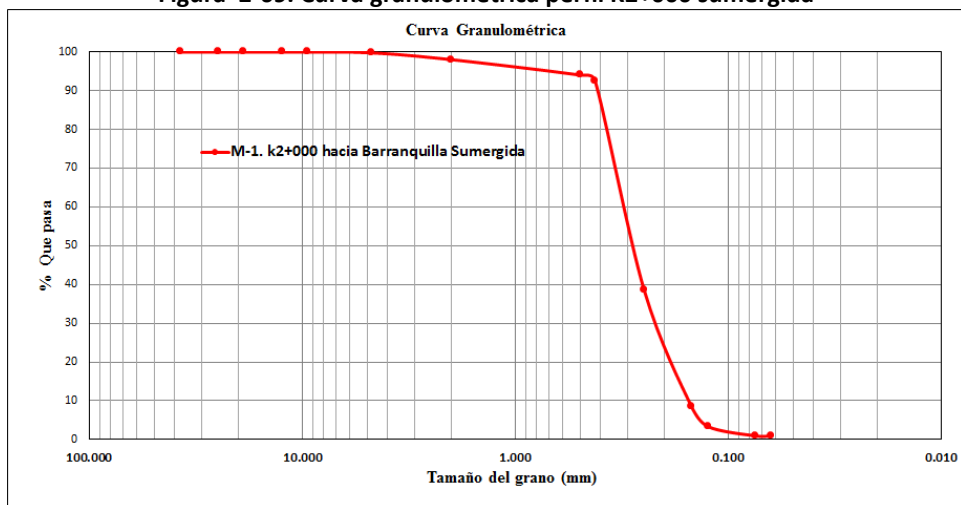
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Tabla 2-13. Resultados granulométricos, valores D50 (mm) para la zona KM-19.**

VALORES D50 (mm)									
MUESTRA DE SUELO	Dirección a Barranquilla				KM19+750	Dirección a Santa Marta			
	K2-000	K1-500	K1-000	K0-500	K0+000	K0+500	K1+000	K1+500	K2+000
Sumergida	0.29	0.27	0.28	0.3	0.32	0.3	0.33	0.29	0.33
Orilla	0.3	0.3	0.35	0.31	0.33	0.32	0.49	0.33	0.32
Playa	0.31	0.31	0.33	0.33	0.32	0.34	0.31	0.45	0.31

Para cada punto analizado en los diferentes perfiles, se muestra las gráficas de curva granulométrica y la caracterización para los diámetros  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  y  $D_{50}$ . Ver Figura 2-69 a la Figura 2-70

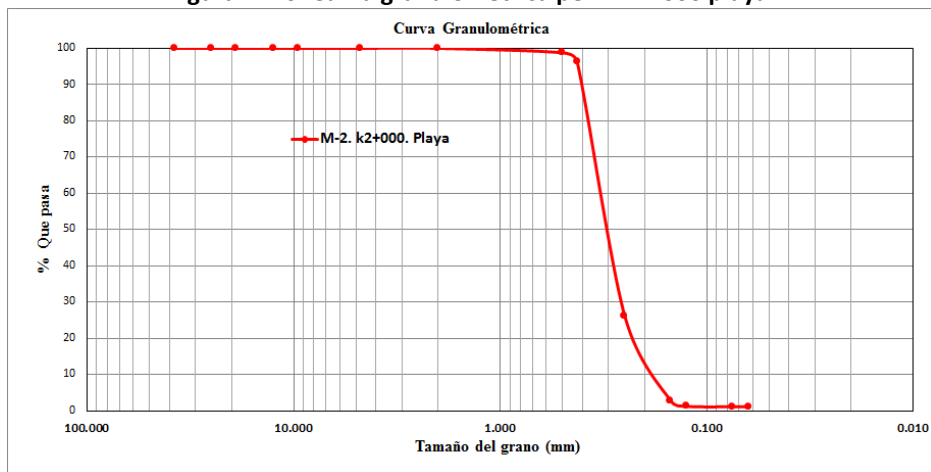
Figura 2-69. Curva granulométrica perfil K2+000 sumergida



Identificación Muestra	Clasificación				Humedad(%)	Limite Liq.	Limite Plas.	Indice Plas.	Cc	Cu
k2+000 hacia B/quilla (s)	Arena Fina Parda Gris					NL	NP		0.99	2.06
Identificación Muestra	D10	D30	D50	D60	D100	% Grava	% Arena	% Limo- Arcilla		
k2+000 hacia B/quilla (s)	0.15	0.22	0.29	0.319	0.500	0.000	98.89	0.94		

Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

Figura 2-70. Curva granulométrica perfil K2+000 playa.

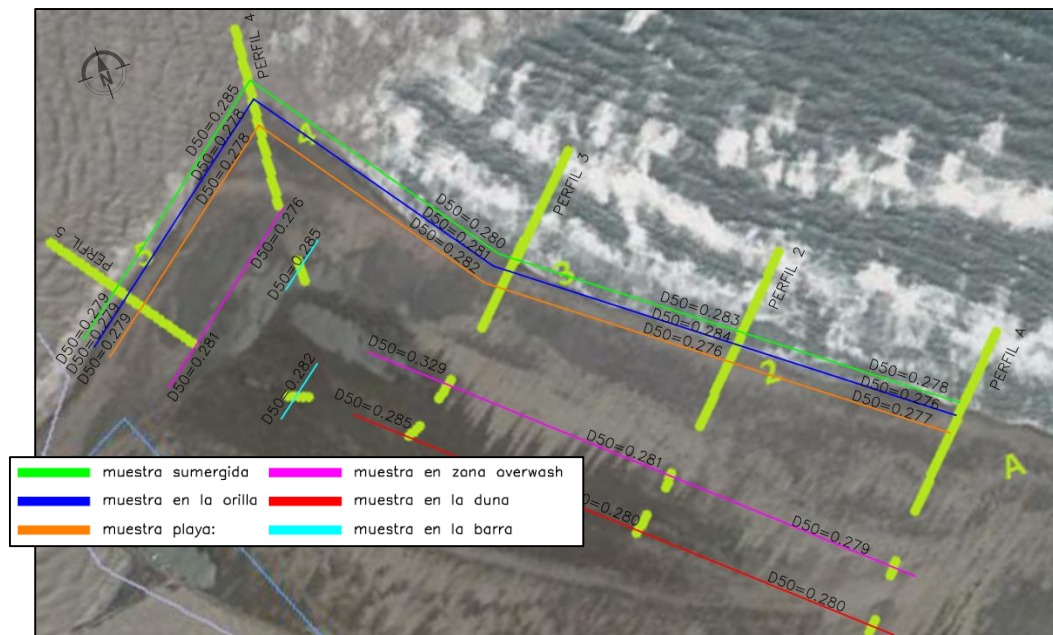


Identificación Muestra	Clasificación				Humedad(%)	Limite Liq.	Limite Plas.	Indice Plas.	Cc	Cu
k2+000. Playa	Arena Fina Parda Gris					NL	NP		1.11	1.85
Identificación Muestra	D10	D30	D50	D60	D100	% Grava	% Arena	% Limo- Arcilla		
k2+000. Playa	0.18	0.26	0.31	0.335	0.500	0.000	98.89	1.11		

Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.





**Figura 2-72. Localización de la zona de toma de muestra de sedimentos en la desembocadura río Magdalena.**

Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

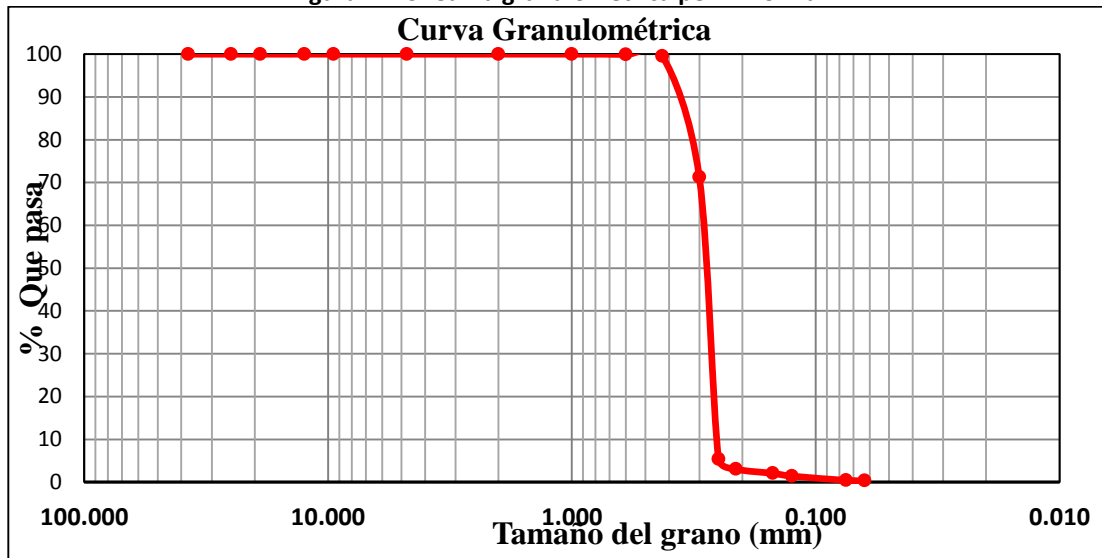
La Tabla 2-14, muestra los valores referente al  $D_{50}$ , en cada punto seleccionado.

**Tabla 2-14. Resultados granulométrico, valores  $D_{50}$  para la zona de la desembocadura del río Magdalena.**

MUESTRA DE SUELO	VALORES $D_{50}$				
	PERFIL A	PERFIL 2	PERFIL 3	PERFIL 4	PERFIL 5
<b>Sumergida</b>	0.278	0.283	0.28	0.285	0.279
<b>Orilla</b>	0.276	0.284	0.281	0.278	0.279
<b>Playa</b>	0.277	0.276	0.282	0.278	0.279
<b>Zona overwash</b>	0.279	0.281	0.329	0.276	0.281
<b>Duna</b>	0.28	0.28	0.285		
<b>Barra</b>				0.285	0.282

Para cada punto analizado en los diferentes perfiles, se muestra las gráficas de curva granulométrica y la caracterización para los diámetros  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  y  $D_{50}$ . Ver Figura 2-73 a la Figura 2-75

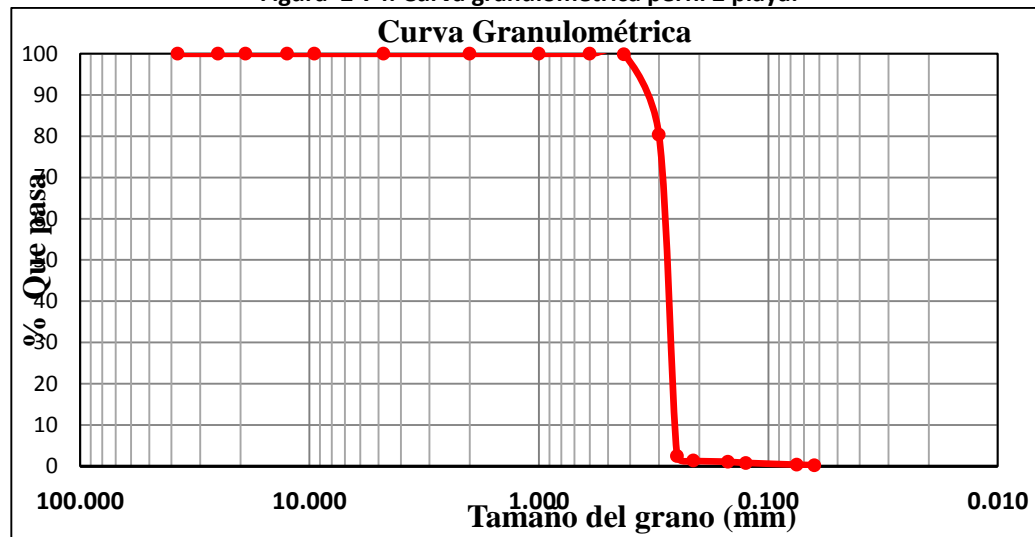
Figura 2-73. Curva granulométrica perfil 2 orilla.



Identificación Muestra	Clasificación				Humedad(%)	Limite Liq.	Limite Plas.	Indice Plas.	Cc	Cu
P2 ESTRAN	Arena Media Gris					NL	NP		0.98	1.15
Identificación Muestra	D10	D30	D50	D60	D100	% Grava	% Arena	% Limo- Arcilla		
P2 ESTRAN	0.253	0.269	0.284	0.291	1.000	0.000	99.54	0.46		

Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

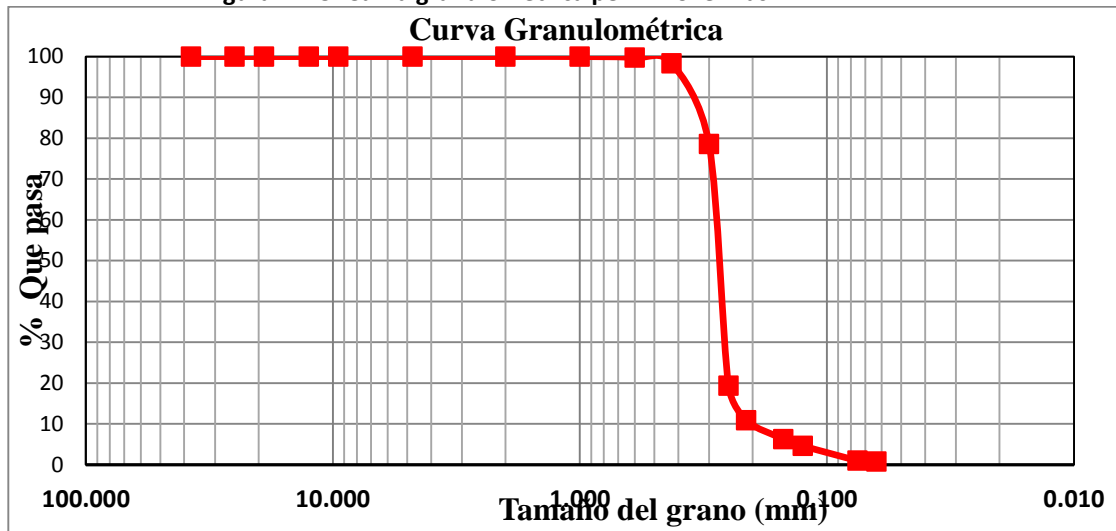
Figura 2-74. Curva granulométrica perfil 2 playa.



Identificación Muestra	Clasificación				Humedad(%)	Limite Liq.	Limite Plas.	Indice Plas.	Cc	Cu
P2 ARRIBA	Arena Media Parda					NL	NP		0.98	1.13
Identificación Muestra	D10	D30	D50	D60	D100	% Grava	% Arena	% Limo- Arcilla		
P2 ARRIBA	0.255	0.268	0.281	0.287	0.425	0.000	99.64	0.36		

Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

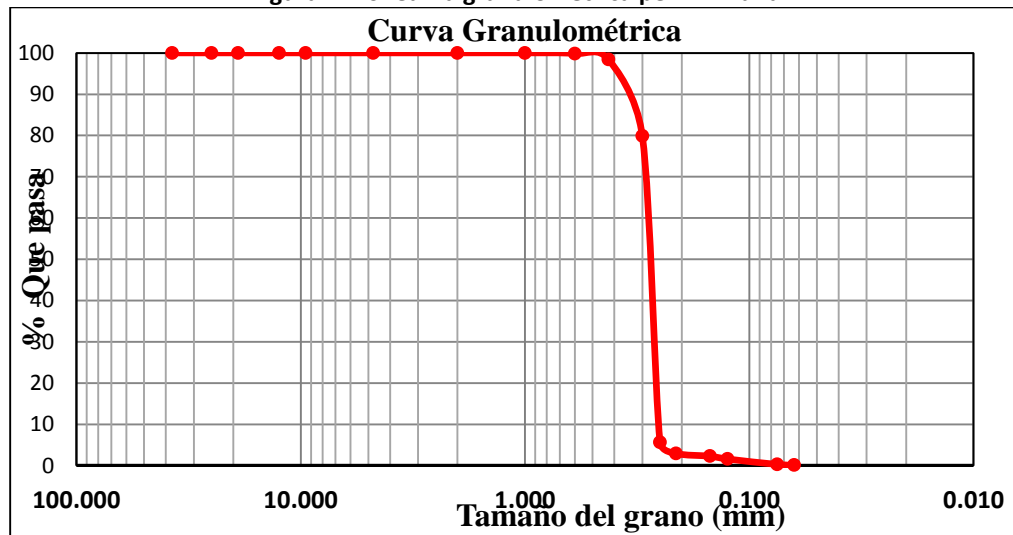
Figura 2-75. Curva granulométrica perfil 2 overwash.



Identificación Muestra	Clasificación			Humedad(%)	Limite Liq.	Limite Plas.	Indice Plas.	Cc	Cu
P2+1	Arena Media Gris				NL	NP		0.03	66.50
Identificación Muestra	D10	D30	D50	D60	D100	% Grava	% Arena	% Limo- Arcilla	
P2+1	0.201	0.259	0.276	13.336	1.000	0.000	89.16	10.84	

Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

Figura 2-76. Curva granulométrica perfil 2 Duna

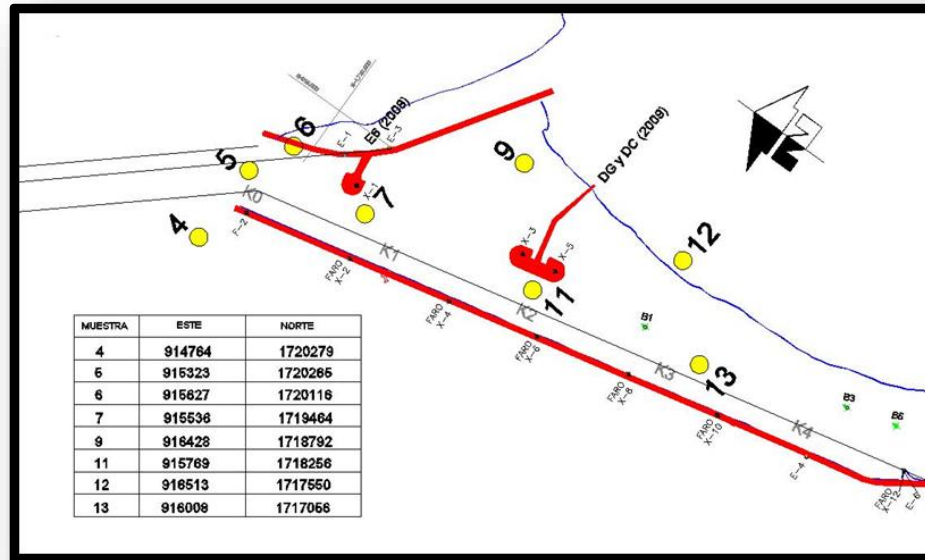


Identificación Muestra	Clasificación			Humedad(%)	Limite Liq.	Limite Plas.	Indice Plas.	Cc	Cu
P2+2	Arena Media Gris				NL	NP		0.98	1.13
Identificación Muestra	D10	D30	D50	D60	D100	% Grava	% Arena	% Limo- Arcilla	
P2+2	0.253	0.266	0.280	0.287	0.600	0.000	99.74	0.26	

Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

A manera de complementar la información anterior, se presenta registros de sedimentos en la desembocadura del río y Zona del Navegable en Bocas de Cenizas, que fueron ejecutadas por la Universidad del Norte para CORMAGDALENA. La figura 2-77, muestra los puntos de ubicación de la muestra de los estudios realizados por la Universidad del Norte.

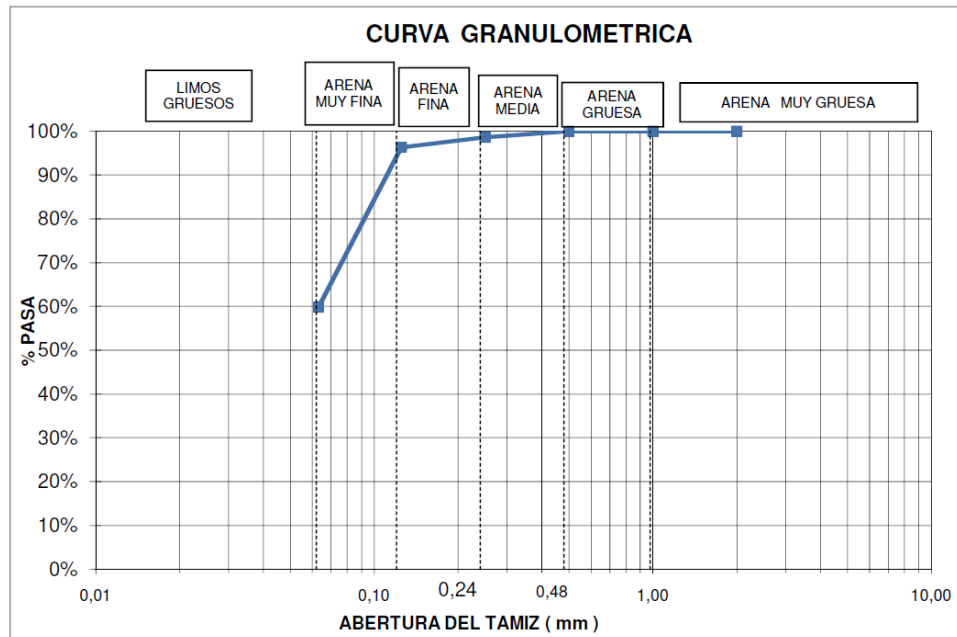
**Figura 2-77. Ubicación de muestras de sedimentos.**



*Fuente: Universidad del Norte, Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores.*

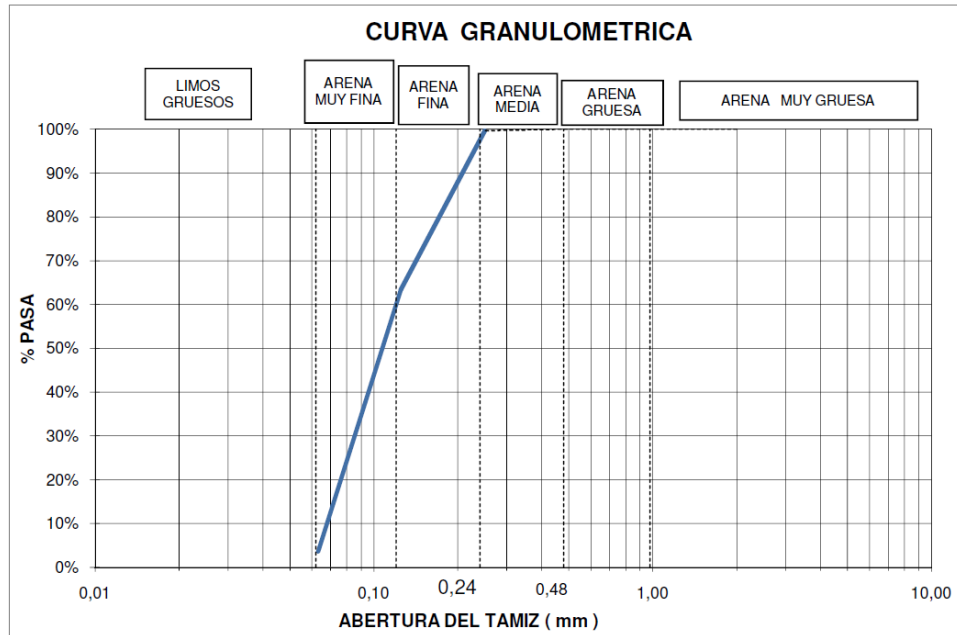
Las curvas granulométricas, ya muestra que el material del fondo de río presenta diámetros más finos, típico del río Magdalena. Las curvas son gradas y contiene los materiales más gruesos pero predominan los finos, que corresponde en sí mismo a una característica de la cuenca del río. Ver Figura 2-78.

Figura 2-78. Curva granulométrica muestra M4.



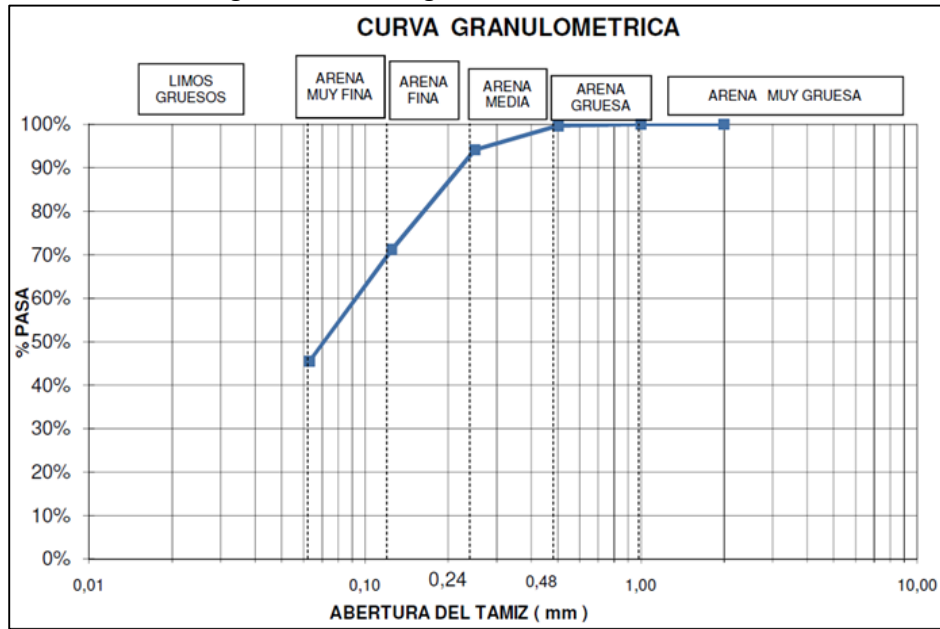
Fuente: Universidad del Norte.

Figura 2-79. Curva granulométrica muestra M5.



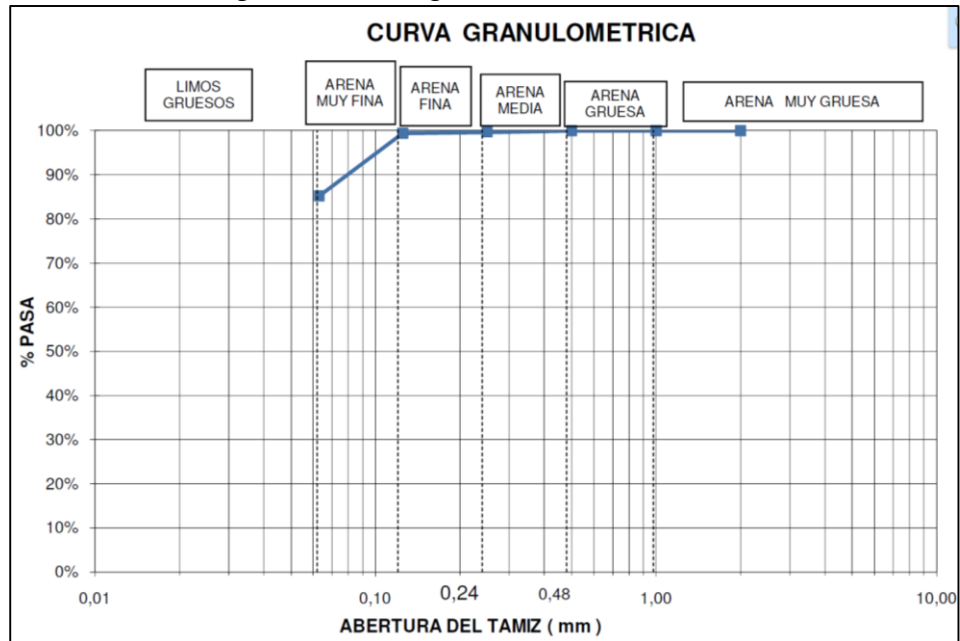
Fuente: Universidad del Norte.

Figura 2-80. Curva granulométrica muestra M6.



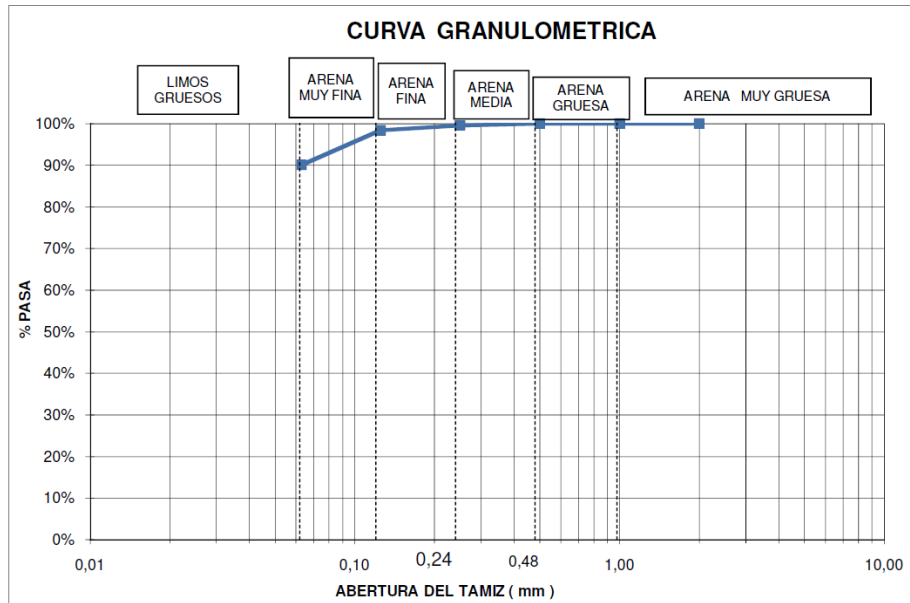
Fuente: Universidad del Norte.

Figura 2-81. Curva granulométrica muestra M7.



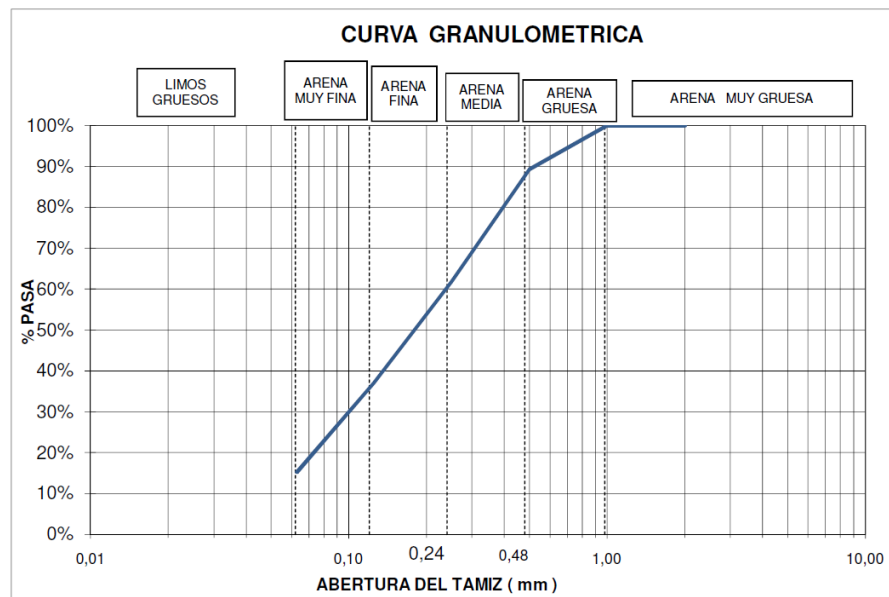
Fuente: Universidad del Norte.

**Figura 2-82. Curva Granulométrica muestra M9.**



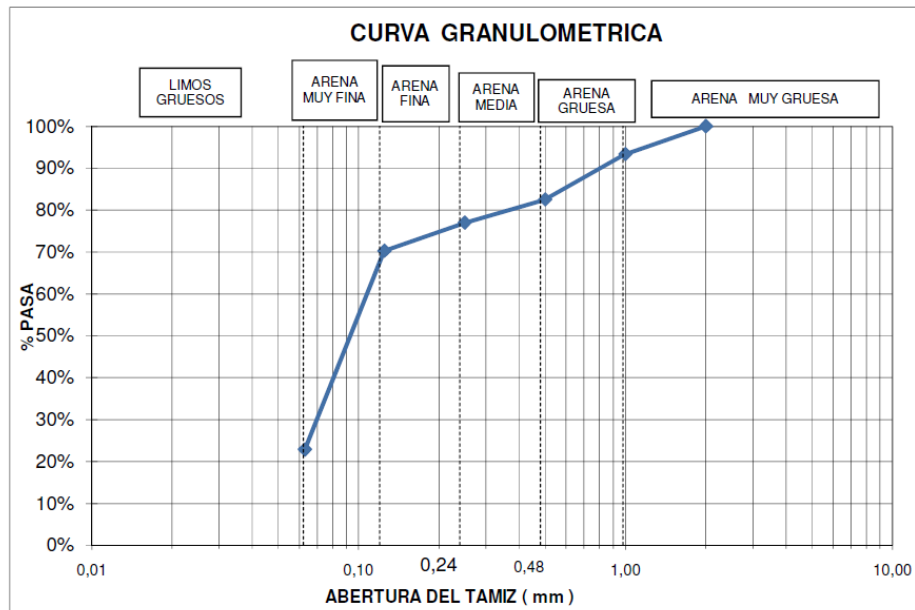
Fuente: Universidad del Norte.

**Figura 2-83. Curva Granulométrica muestra M11.**



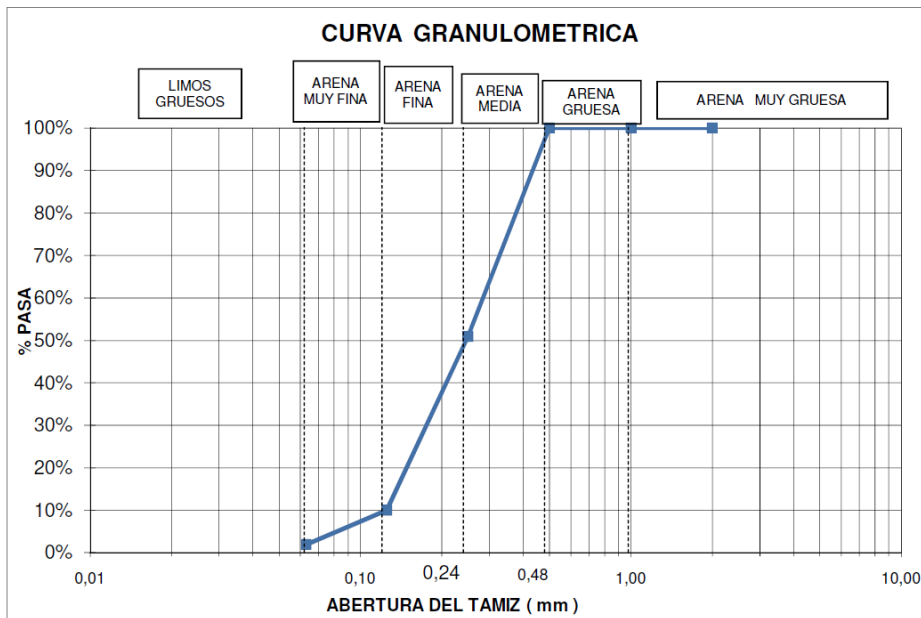
Fuente: Universidad del Norte.

Figura 2-84. Curva Granulométrica muestra M12



Fuente: Universidad del Norte.

Figura 2-85. Curva Granulométrica muestra M13.



Fuente: Universidad del Norte.



### 2.5.3. PERFILES DE PLAYA

La representación de un perfil de playa, requiere información detallada tanto batimétrica con topográfica que permita integrar un perfil entre la zona seca de la playa con la sumergida. Para la zona de estudio contamos con información de detalle, para el sector del KM-19 de la vía que nos permitirá realizar el análisis en el tramo identificado donde hay mayor erosión. Para el tramo de menor erosión próximo al sector de Pueblo Viejo contamos con información de detalle el Malecón del municipio de Ciénaga. Esta información corresponde a datos últimos tomados en el segundo semestre del año 2014 (SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena – Alcaldía de Ciénaga).

Adelantando hacia el próximo tema correspondiente a la prognosis, en este apartado se incluirá el análisis de perfil de equilibrio, ya que es representativo en la condición actual de cómo está el perfil medido con respecto al de equilibrio y nos permite determinar esta condición para el tema que estamos evaluando en la diagnosis.

#### 2.5.3.1. Perfil de Equilibrio de DEAN.

La playa sumergida es la parte del perfil comprendida entre la cota “cero” y la profundidad de cierre o el punto de intersección del perfil de aportación con el perfil actual de playa.

Se ha empleado para el diseño el modelo de perfil de equilibrio de Dean incluyendo la modificación propuesta por Kriebel et. al. (1991) para evitar la existencia de una pendiente infinita en la línea de orilla.

La expresión que describe este perfil de equilibrio es la siguiente:

$$\begin{aligned} x &= h / m & h < h_t \\ x &= x_0 + \left( \frac{h}{A} \right)^{3/2} & h > h_t \end{aligned} \quad \text{Ec. (20)}$$

Donde x es la coordenada transversal o distancia a la orilla, h es la profundidad, m es la pendiente de la playa en las inmediaciones de la línea de orilla,  $x_0$  es el punto de intersección entre la parte plana y cóncava del perfil que se produce a una profundidad  $h_t$ , estando ambas dadas por:

$$x_0 = \frac{h_t}{m} - \left( \frac{h_t}{A} \right)^{3/2} \quad \text{y} \quad h_t = \frac{4}{9} \frac{A^3}{m^2} \quad \text{Ec. (21)}$$

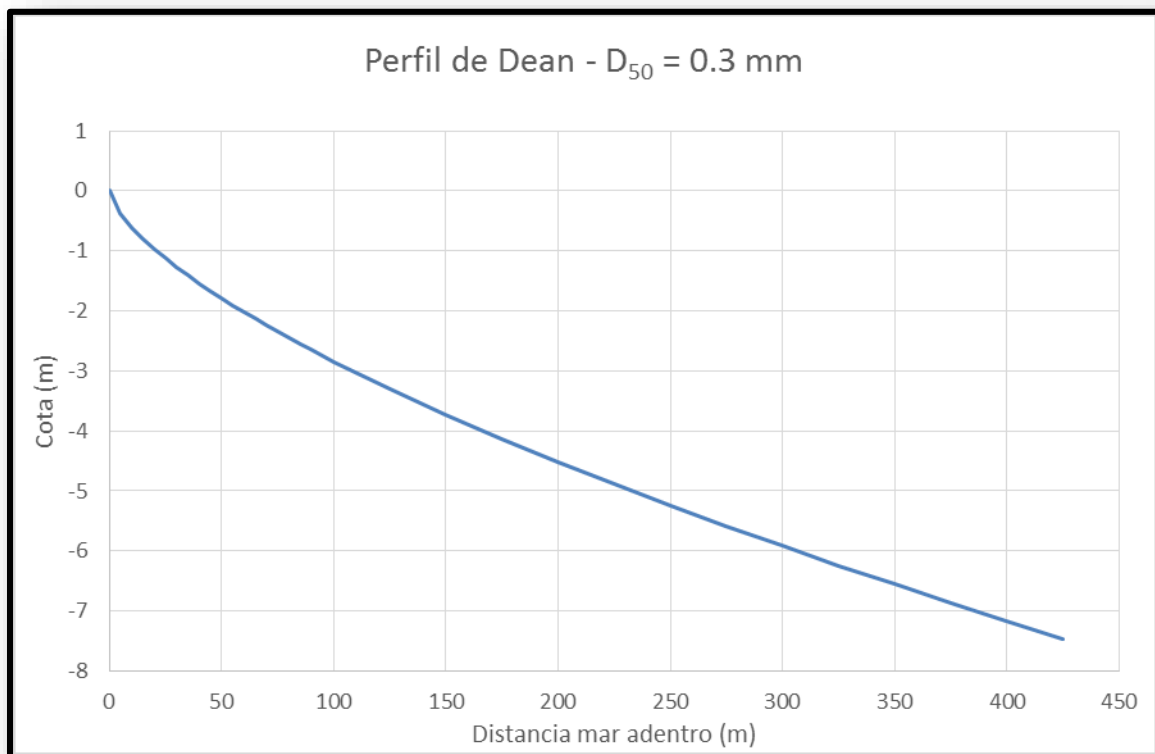
El valor del parámetro A depende del tamaño del sedimento, y su valor puede determinarse a partir de la curva de diseño dada por Moore (1982) que relaciona A (dado en  $m^{1/3}$ ) con el

diámetro medio de sedimento ( $D_{50}$  en mm). Para definir matemáticamente esta curva, Hanson y Kraus (1989) realizaron la siguiente división y aproximación por tramos:

$$\begin{aligned}
 A &= 0,41 \cdot (D_{50})^{0,94} & \text{si} & \quad D_{50} < 0,4 \\
 A &= 0,23 \cdot (D_{50})^{0,32} & \text{si} & \quad 0,4 \leq D_{50} < 10,0 \\
 A &= 0,23 \cdot (D_{50})^{0,28} & \text{si} & \quad 10,0 \leq D_{50} < 40,0 \\
 A &= 0,46 \cdot (D_{50})^{0,11} & \text{si} & \quad 40,0 \leq D_{50}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. (22)}$$

En el caso del presente estudio, para un  $D_{50}$  de 0.3 mm de diámetro medio equivalente, el valor del parámetro A considerado es de 0.132 m<sup>-1</sup>. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, muestra el perfil de que debe tener la barra de salamanca para alcanzar esta condición.

Figura 2-86. Perfil de equilibrio teórico de DEAN ( $D_{50} = 0.3$  mm).

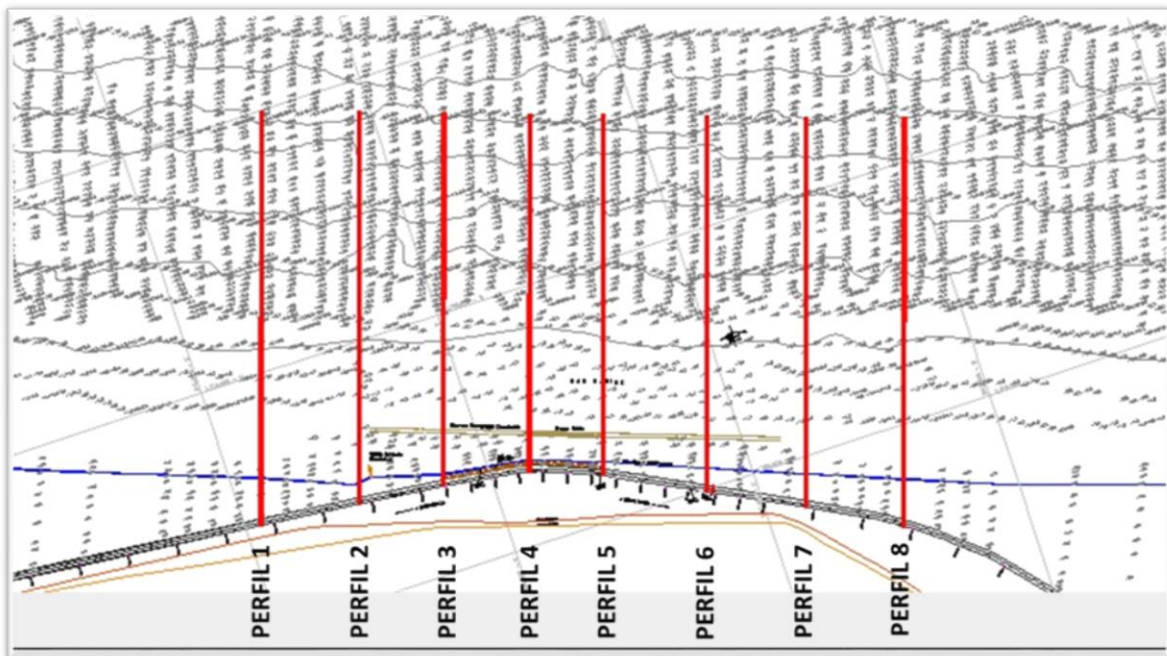


Fuente: Propia.

### 2.5.3.2. Perfiles característicos en el tramo de mayor erosión (sector KM-19).

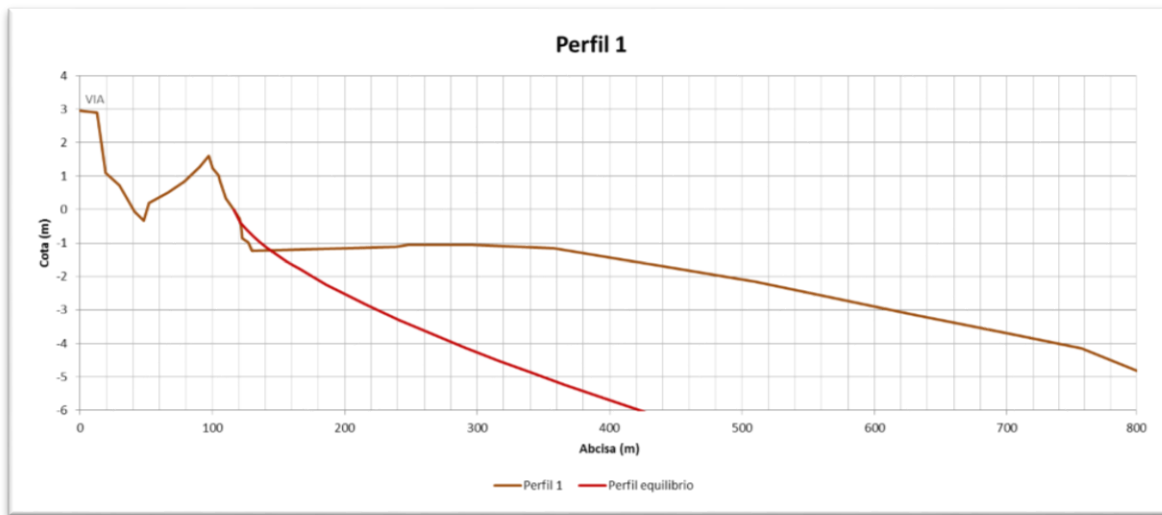
En este sector la barra presenta características que están relacionada con el efecto de la zona haber sido parte del Delta del río Magdalena. Se observa una gran barra de sedimentos no permite que el perfil de playa activo no se desarrolle en toda su longitud (profundidad), en cambio se presenta un perfil de playa apoyado sobre una plataforma de profundidad reducida (variable, entre -1.5 m y -2.5 m). La figura 2-87, muestra la localización de los perfiles, mientras que los perfiles teóricos de equilibrio, en comparación con los perfiles medidos se muestra en la figura 2-88 a Figura 2-95.

Figura 2-87. Planta de ubicación de las trazas de perfiles analizados.



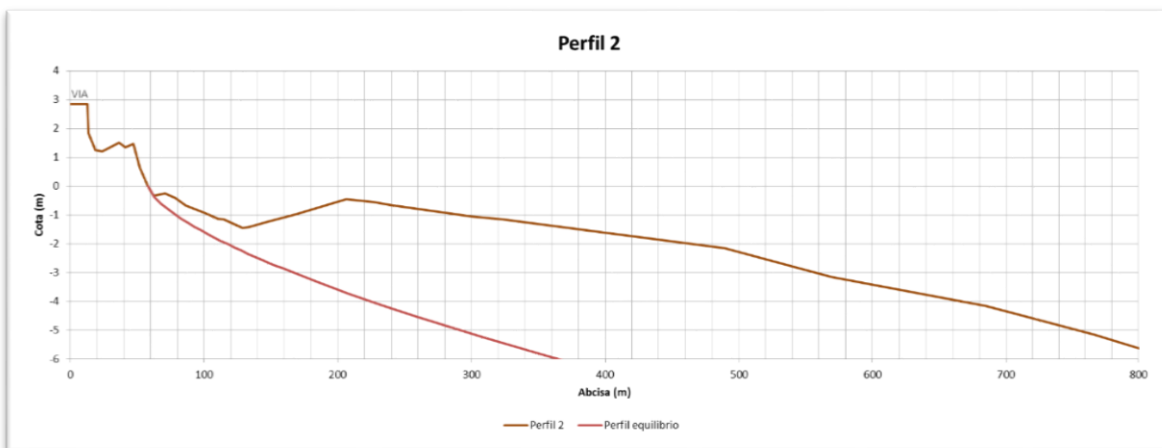
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-88. Comparativo Perfil 1 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean (D50= 0.3 mm).**



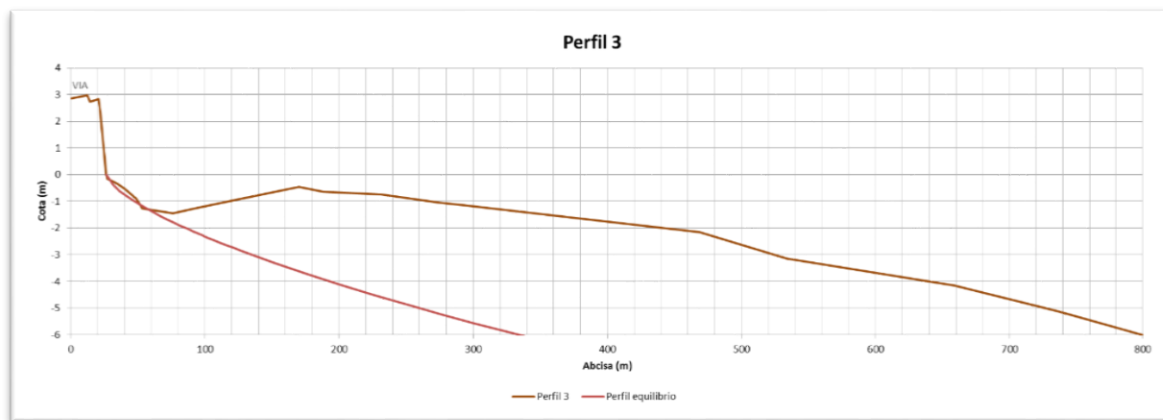
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-89. Comparativo Perfil 2 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean (D50= 0.3 mm).**



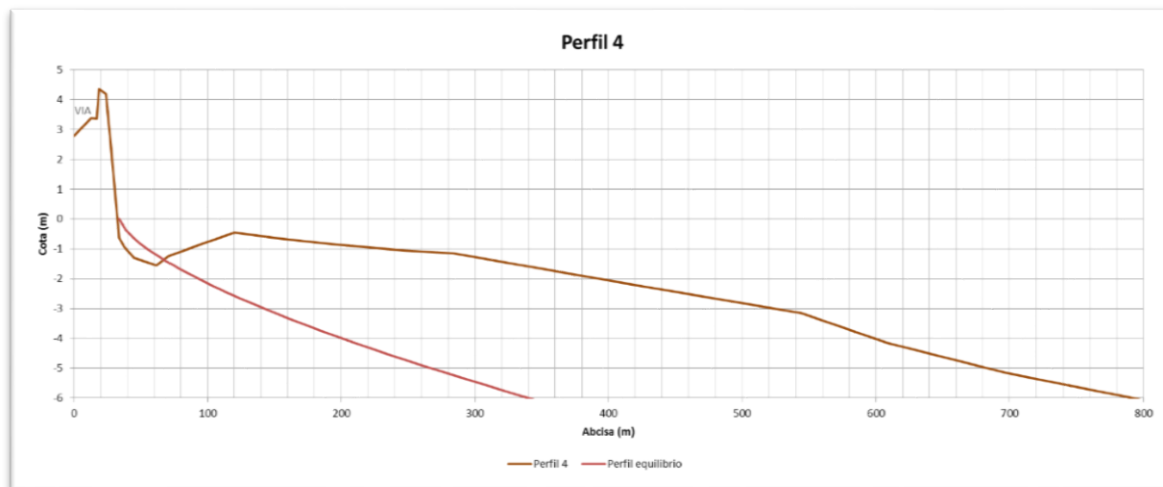
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-90. Comparativo Perfil 3 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean (D50= 0.3 mm).**



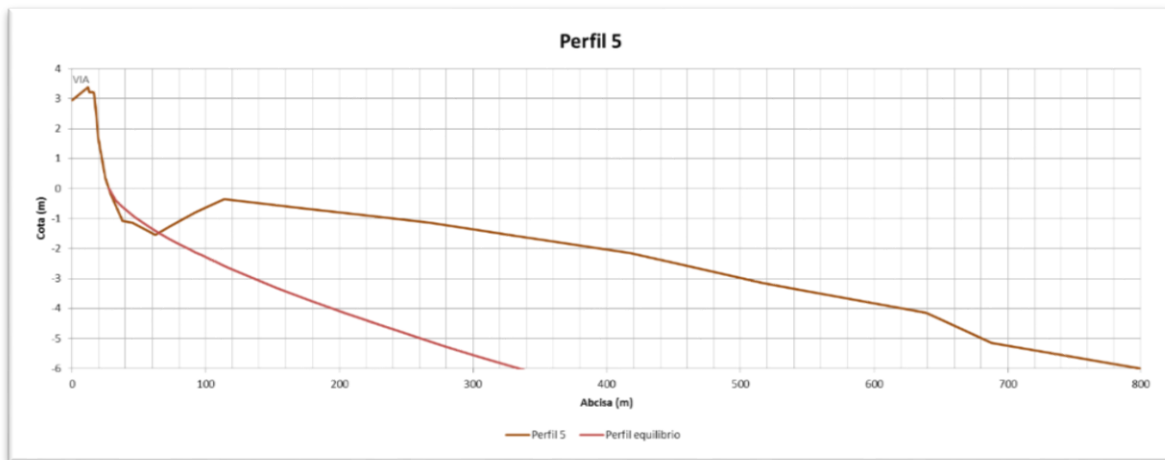
*Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.*

**Figura 2-91. Comparativo Perfil 4 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean (D50= 0.3 mm).**



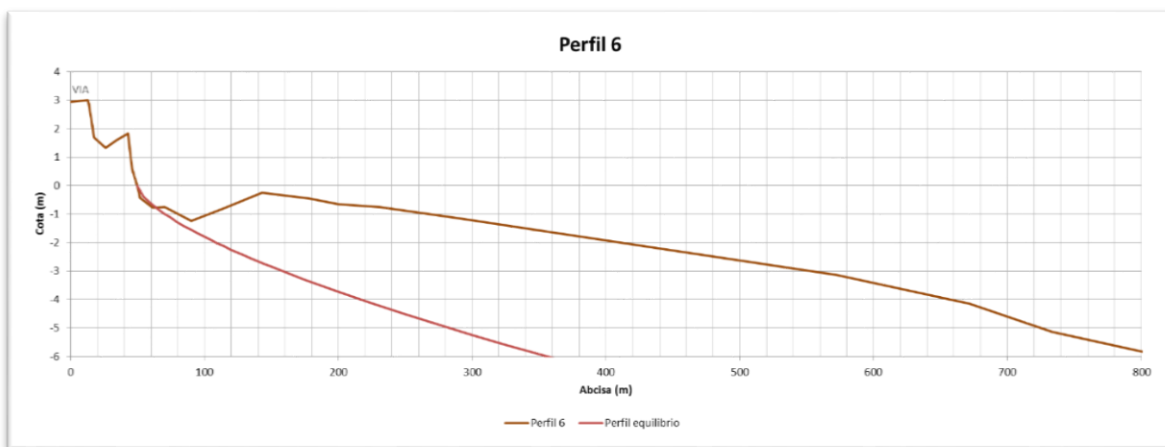
*Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.*

**Figura 2-92. Comparativo Perfil 5 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean (D50= 0.3 mm).**



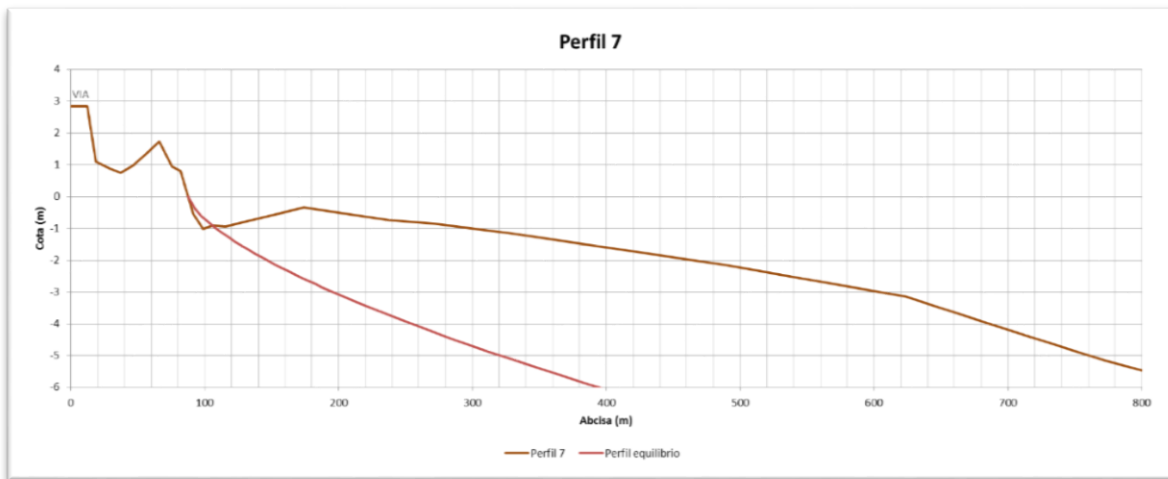
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-93. Comparativo Perfil 6 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean (D50= 0.3 mm).**



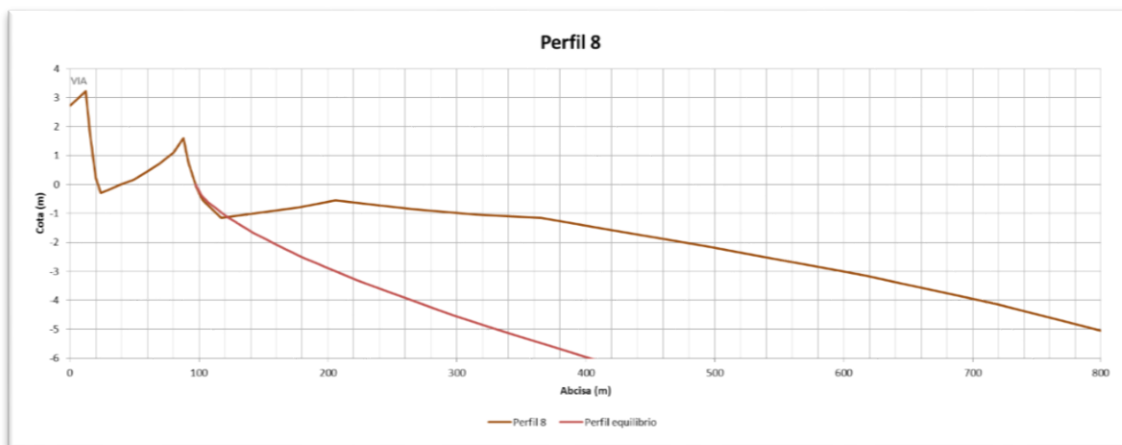
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-94. Comparativo Perfil 7 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean (D50= 0.3 mm).**



Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-95. Comparativo Perfil 8 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean (D50= 0.3 mm).**

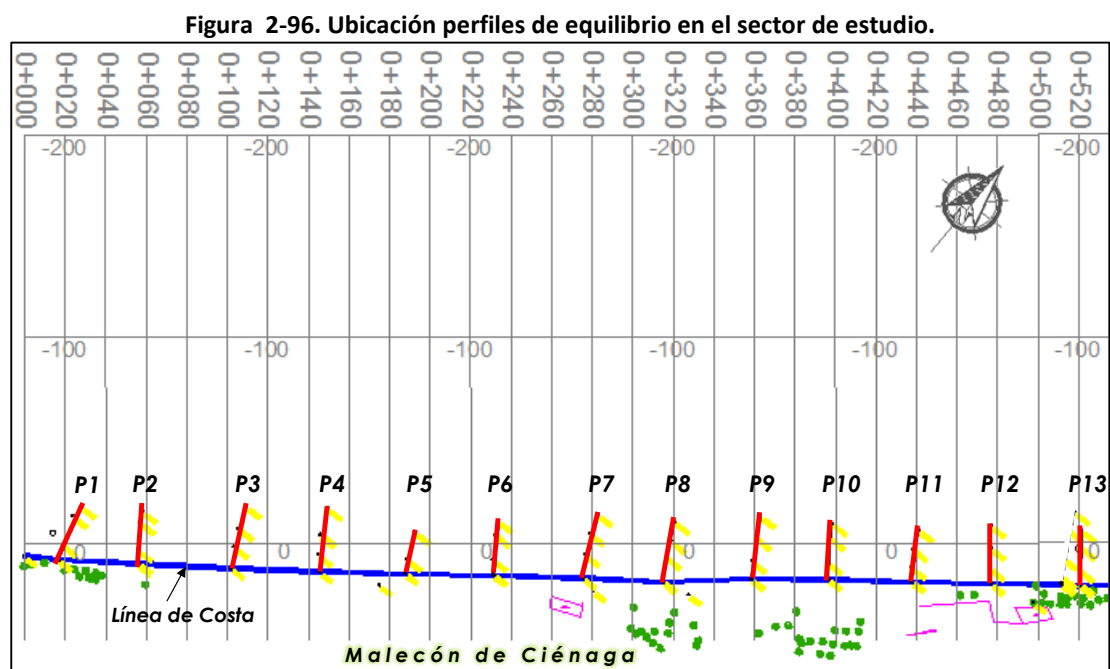


Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

### 2.5.3.3. Perfiles característicos en el tramo menor erosión (sector Pueblo Viejo – Ciénaga).

Para este caso, al igual de lo que se ha identificado en los estudios anteriores en donde se ha observado menor retroceso de la costa, se observa que los perfiles se asemejan a la condición de equilibrio. Ver Figura 2-96y Figura 2-109.

Esta comparativa muestra que actualmente existe un déficit notable de arena para poder tener un perfil de equilibrio y es el resultado de un proceso erosivo longitudinal, que será analizado en el siguiente apartado.

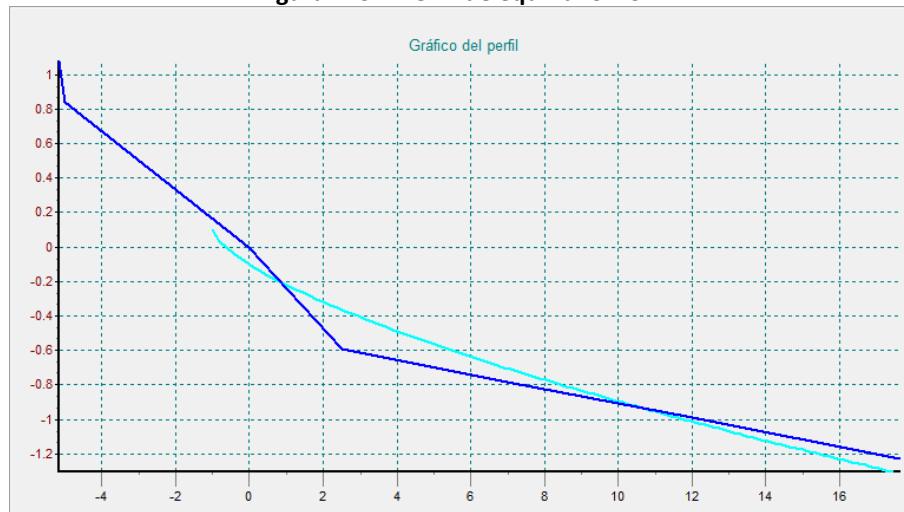


Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

Con base en el levantamiento batimétrico, se seleccionaron 13 perfiles repartidos en el sector de interés, éstos se encuentran distanciados 40 metros, y se tomaron hasta la profundidad promedio de 1.54 metros. Figura 2-97

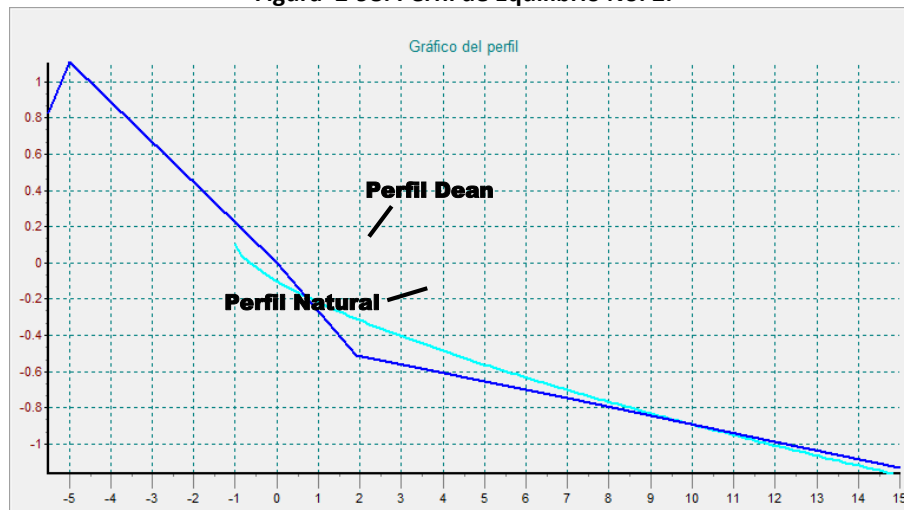


**Figura 2-97. Perfil de equilibrio No. 1**



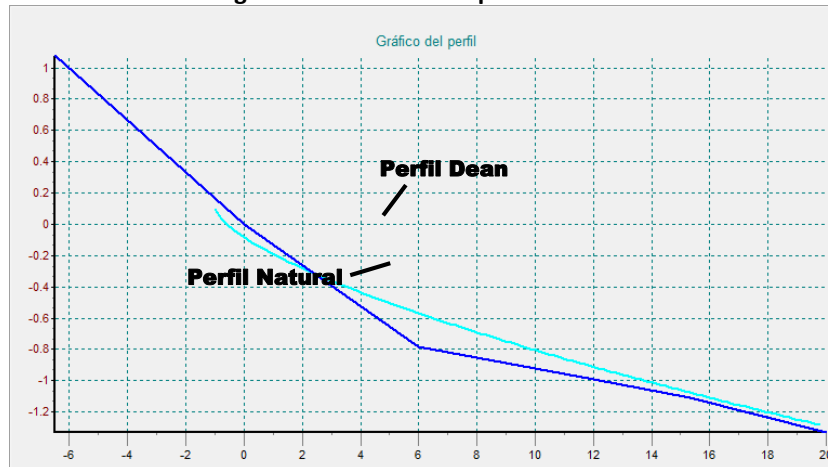
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-98. Perfil de Equilibrio No. 2.**



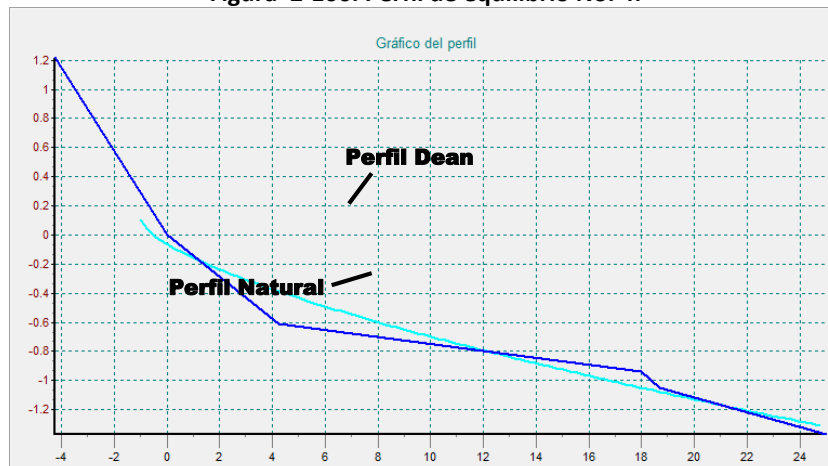
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

Figura 2-99. Perfil de equilibrio No. 3.



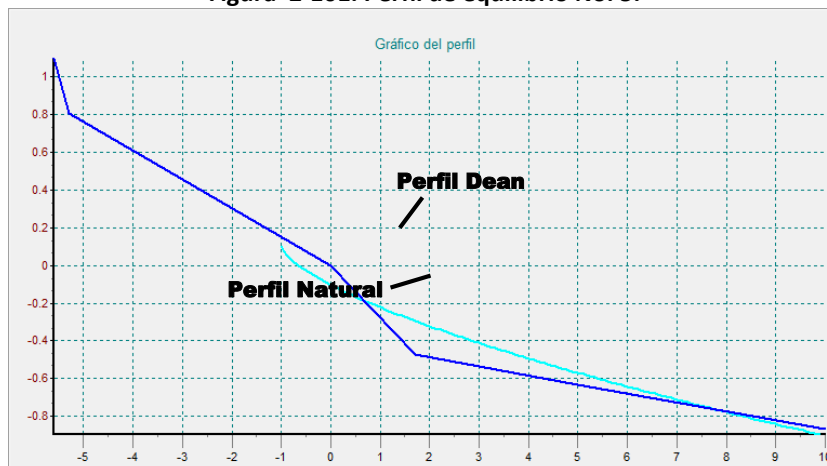
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

Figura 2-100. Perfil de equilibrio No. 4.



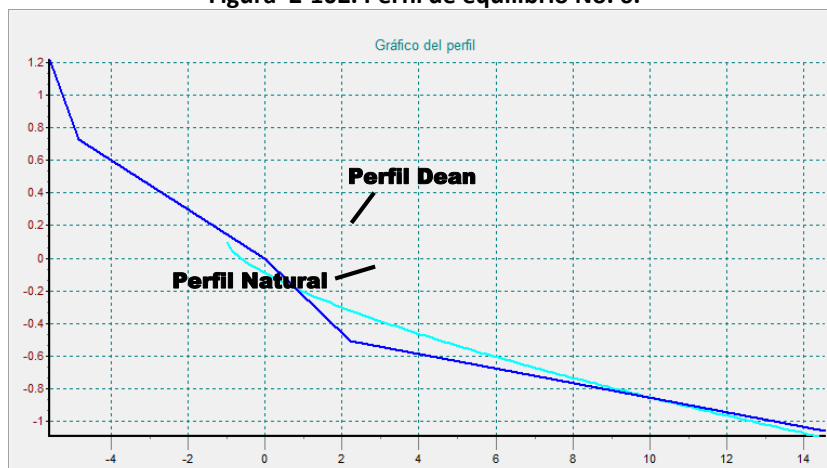
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-101. Perfil de equilibrio No. 5.**



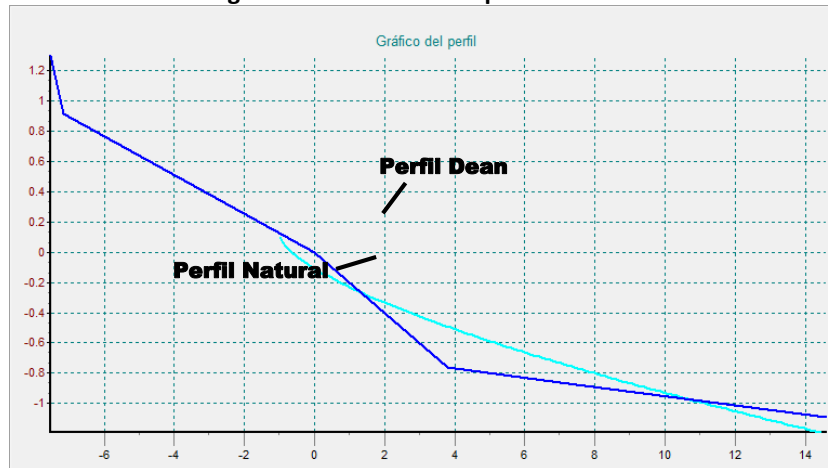
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-102. Perfil de equilibrio No. 6.**



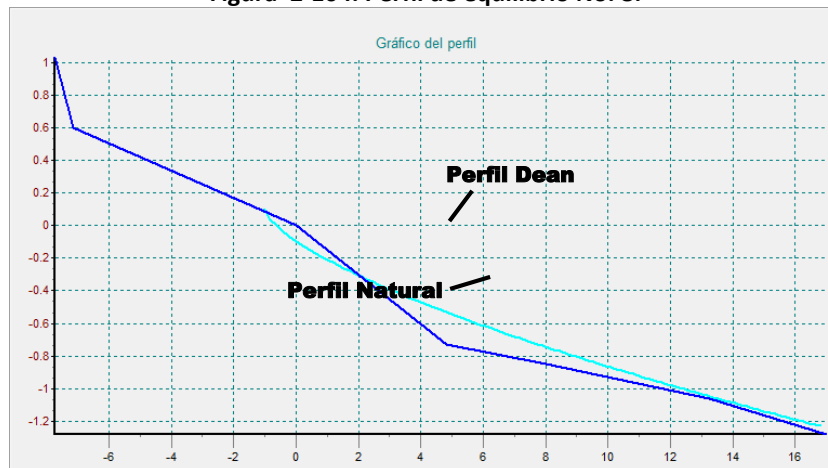
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

Figura 2-103. Perfil de equilibrio No. 7.



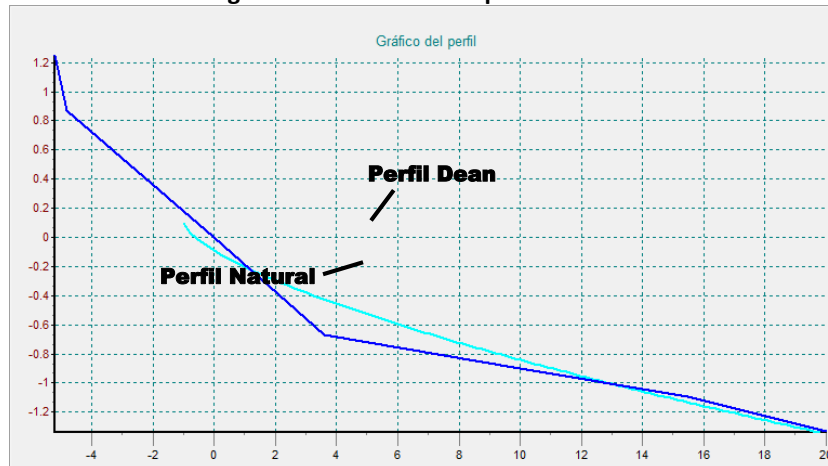
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

Figura 2-104. Perfil de equilibrio No. 8.



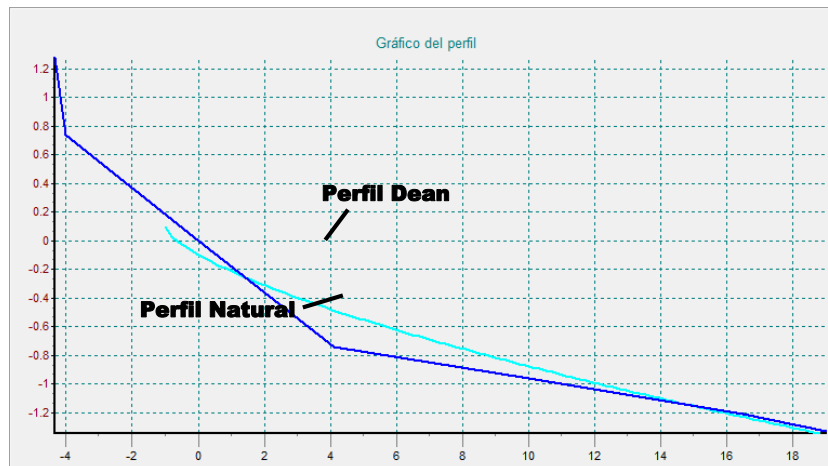
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-105. Perfil de equilibrio No. 9.**



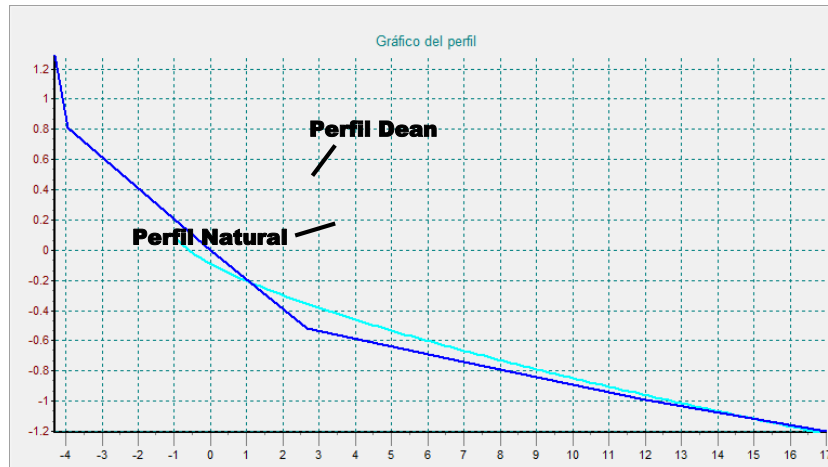
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-106. Perfil de equilibrio No. 10**



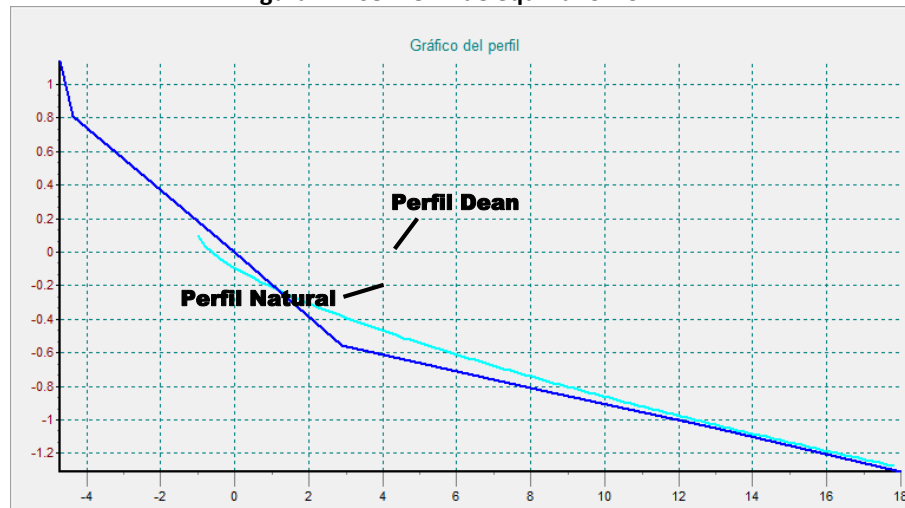
Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-107. Perfil de equilibrio No. 11.**

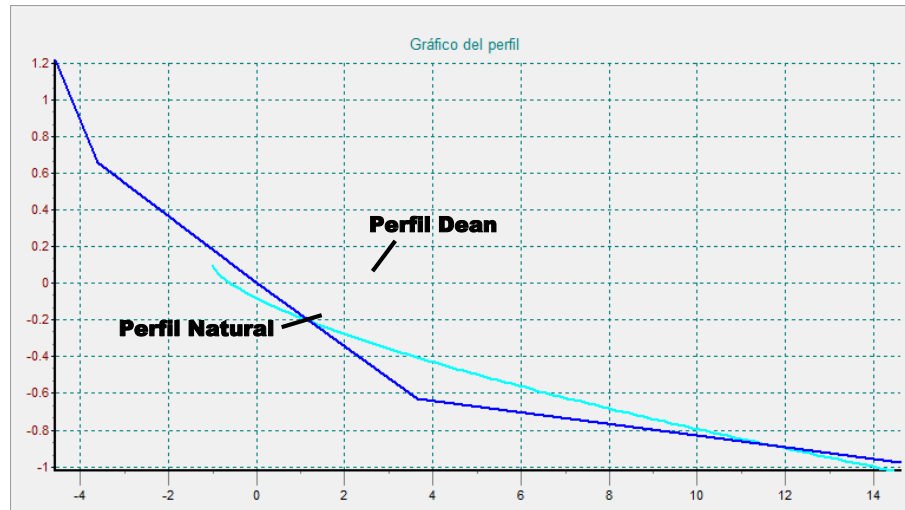


Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-108. Perfil de equilibrio No. 12.**



Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

**Figura 2-109. Perfil de equilibrio No. 13.**

Fuente: SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena.

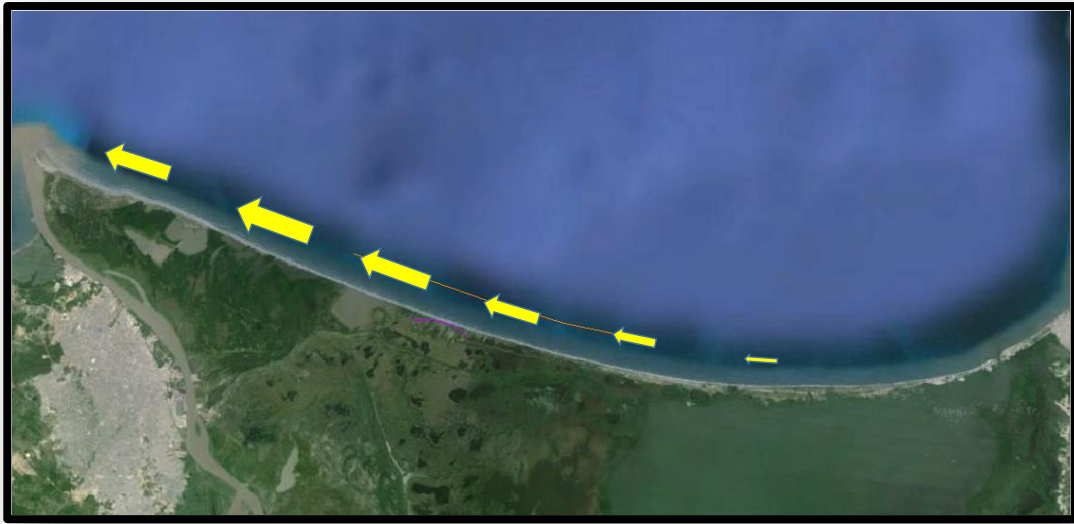
#### 2.5.4. TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS.

El oleaje al propagarse e incidir en la costa hace mover el material que forma la franja litoral. A este movimiento se le conoce como transporte sólido litoral, y es uno de los responsables de la transformación de la costa; en definitiva que exista una dinámica litoral.

El oleaje al llegar a la costa en forma oblicua sobre la costa, genera dos tipos de corrientes: una longitudinal paralela a línea de costa y otra transversal perpendicular a la línea de costa, de tal manera que los sedimentos se mueven en esas dos direcciones, el movimiento paralelo a la línea de costa se le denomina transporte longitudinal de sedimentos.

Las características de los oleajes estudiados en las rosas de las boyas virtuales definidos muestra que las zonas donde hay mayor erosión el oleaje llegan a la costa de forma oblicua. Basado en este concepto, la figura 2-110, muestra que para la zona de estudio el patrón de la dirección del transporte longitudinal de sedimentos, que predomina en dirección Este a Oeste y es interesante apuntar que la tasa bruta del transporte longitudinal bruto en sentido inverso Oeste a Este es solamente un 2% del tiempo dominante, que viene asociada a raros eventos de temporales de componentes W y SW.

**Figura 2-110. Patrón general de la dinámica sedimentaria longitudinal a lo largo de la costa (Aumento del transporte Esta a Oeste).**



*Fuente: Propia*

Es posible el cálculo del transporte longitudinal de sedimentos por incidencia oblicua del oleaje a través de ecuaciones teóricas, estas formulaciones están basadas en la teoría y han sido calibrada con datos reales en la naturaleza. Las formulaciones se basan en el método del flujo medio de energía, en el cual se asume que el volumen de sedimento transportado a lo largo de la costa es proporcional al flujo de energía de la ola, por ese motivo se dice que estima la capacidad que tiene el oleaje para producir el transporte de sedimentos, es decir estiman la capacidad de transporte asociado al clima y la característica de los sedimentos.

Para ello se ha utilizado las fórmulas más reconocidas en la ingeniería como son la de Kamphuis (1991), Van Rijn (1993) y CERC (1984).

- **Descripción de las formulaciones:**

**Formula del CERC:** Esta fórmula fue desarrollada.-Cuerpo de Ingenieros de los EE.UU, relaciona el transporte longitudinal de sedimentos con el flujo de energía debido al oleaje (Manual Shore Protection, 1984):

$$I = KEc_{g,br} \sin \theta_{br} \cos \theta_{br}$$

En la que:  $I$  = tasa de transporte litoral.

$E = 1/8 \rho g (H_{rms,br})^2$  = Energía del oleaje.

$H_{rms,br}$  = Altura de ola cuadrática en rotura



$c_{g,br} = n_{br} c_{br}$  = Celeridad de grupo.

$\theta_{br}$  = ángulo de la onda en la línea de rotura (entre la línea de onda cresta y la costa; o entre la onda dirección de propagación y de la orilla dirección normal).

$K$  = coeficiente (= 0,77).

La calibración de la fórmula del CERC, se realizó con mediciones de campo y laboratorio, resultando un  $K = 0.77$ , que es el valor recomendado al día para su uso con  $H_{rms,br}$  (Shore Manual de Protección, 1977, 1984). Los K-valores reportados para estos estudios entre 0,2 y 1,6 (Bodge y Kraus, 1991).

Usando la altura de ola significativa ( $H_s = \sqrt{2H_{rms}}$ ),  $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$ ,  $K = 0.77$  y  $p = 0,4$ , la ecuación del CERC se puede reordenar a:

$$Q_{t,vol} = 0.023 (H_{s,br})^2 n_{br} c_{br} \sin(2\theta_{br}) \quad (2)$$

En la que:

$Q_{t,vol}$  =  $I / ((1 - p)(\rho_s - \rho)g)$  = Transporte de sedimentos por volumen ( $m^3 / s$ , incluyendo los poros); el sedimento el transporte en masa seca es  $Q_{t,mass} = (1 - p)\rho_s Q_{t,vol}$ ;  $H_{s,br}$  = altura de ola significativa en la línea de rotura (m);  $c_{br}$  = velocidad de fase de las olas en la línea de rotura  $\cong (gh_{br})^{0.5}$ ;  $n_{br}$  = coeficiente en la línea de rotura  $\cong 1$ ;  $\theta_{br}$  = ángulo de onda en la línea de rotura ( $^\circ$ );  $H_{br}$  = profundidad del agua en la línea de rotura (m);  $p$  = factor de porosidad ( $\cong 0,4$ );  $\rho_s$  = densidad de sedimentos ( $\cong 2,650 \text{ kg/m}^3$ ).

Aplicando

$$n_{br} \cong 1, c_{br} \cong (g h_{br})^{0.5}, \text{ Y } \gamma_{br} = H_{br} / h_{br}$$

$$Q_{t,vol} = 0.023 g^{0.5} (\gamma_{br})^{-0.51} (H_{s,br})^{2.5} \sin(2\theta_{br})$$

$$Q_{t,mass} = 0,023 (1 - P) \rho_s g^{0.5} (\gamma_{br})^{-0.52} (H_{s,br})^{2.5} \sin(2\theta_{br})$$

Usando

$$p = 0.4,$$

$$\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3 \text{ Y}$$

$$\gamma_{br} = 0.8$$

Se tiene finalmente que la fórmula que representada de la siguiente manera:

$$Q_{t,mass} = 128 (H_{s,br})^{2.5} \sin(2\theta_{br}) \quad (5)$$

En la formulación del CERC los parámetros más importantes son la altura de las olas y el ángulo de onda. Un error de 10% en la altura de ola en la línea de rotura produce un error del 25% en el cálculo del transporte de sedimentos. La ecuación no muestra ninguna influencia del diámetro de las partículas y de la playa con pendiente hacia el interior la zona de rompientes. Por lo tanto, el CERC-fórmula sólo es válido para un estrecho rango de condiciones como la representada por los datos de calibración. Según Kamphuis (1991), el CERC-fórmula estándar ( $K = 0,77$ ) sobre predice considerablemente las tasas de transporte para tamaños de partícula en el rango de 0,2 a 0,6 mm y playas con pendiente entre = 0,01 a 0,1.

Existe una formulación que puede relacionar el K en función del diámetro de sedimentos  $D_{50}$ , en donde  $K=1.5\exp(-2.5d_{50})$ ,  $d_{50}$  en mm.

La fórmula del CERC-fórmula no se puede aplicar cuando las velocidades de corrientes de marea son significativas.

**Fórmula Kamphuis (1991):** Con base en el análisis dimensional y calibración utilizando datos de laboratorio y de campo, con  $d_{50} = 200$  a 600 micras y playas con pendientes entre 0.015 a 0.15, el transporte de sedimentos (en kg / s) está dado por:

$$Q_{t,im} = 2.33 (T_p)^{1.5} (\tan \beta)^{0.75} (d_{50})^{-0.25} (H_{s,br})^2 [\sin(2\theta_{br})]^{0.6} \quad (6)$$

Con:

$Q_{t,im}$  = Transporte de sedimentos (kg / s); la masa seca se relaciona con la masa sumergida por  $Q_{t,mass} = \rho_s / (\rho_s - \rho) Q_{t,immersed,mass}$ ; el factor de conversión es de 1,64.

$H_{s,br}$  = Altura de ola significativa en la línea de rompiente (m).

$\theta_{br}$  = ángulo de onda en la línea rompiente (°);

$d_{50}$  = tamaño medio de partículas en surfzone (m);

$\tan \beta$  = Pendiente de la playa, definida como la relación entre la profundidad del agua en la línea de rotura y la distancia de la línea de playa de agua que sigue hacia la línea de rotura.

$T_p$  = periodo pico del oleaje.

El valor 2,33 es un coeficiente dimensional relacionada con el sistema de medidas (SI) asumiendo agua salada ( $1030 \text{ kg/m}^3$ ).

**Van Rijn (la 2001, 2002):** La fórmula de Van Rijn, es una ecuación que determina el transporte de sedimentos de manera sencilla, desarrollada con base datos de transporte calculados con el modelo CROSMOR y mediciones en campo en la zona de rompientes de varias playas. Los transportes de sedimentos están relacionados como función del parámetro  $W = (H_{s,br})^3 \sin(2\theta_{br}) \sin(2\theta_{br})$ .

La ecuación definida es la siguiente:

$$Q_{t,mass} = 40(H_{s,br})^3 \sin(2\theta_{br})$$

Con:

$Q_{t,mass}$  = Transporte de sedimentos (en kg / s; masa seca)

$H_{s,br}$  = Altura de ola significativa en línea de rotura breakerline (en m)

$\theta_{br}$  = Angulo de incidencia de la onda en la línea de rotura, breakerline a costa normal (en grados).

La formulación es válida para tamaños de granos de arena con  $d_{50}$  entre 150 y 500  $\mu\text{m}$ , y las pendientes entre 0,02 y 0,1. El conjunto de datos es demasiado pequeño para detectar cualquier efecto del tamaño de grano y / o pendiente.

Utilizando un enfoque similar a la de Bagnold (1963) y Komar (1979), la ecuación también se puede expresar como:

$$Q_{t,mass} = K_1(H_{s,br})^{2.5}V_{wave,L}$$

$$V_{wave,L} = K_2(gH_{s,br})^{0.5} \sin(2\theta_{br})$$

Con:

$V_{wave,L}$  = Velocidad longshore a mediados de la zona de surf debido a las olas rompiendo,

$$K_1 K_2 g^{0.5} = 40.$$

Utilizando la ecuación anterior, la tasa de transporte litoral se describe como una combinación de un parámetro agitación relacionada onda y velocidad de la corriente litoral de la ola impulsada.  $V_{wave,L}$

En el medio de la zona de surf. Este enfoque puede utilizarse para incluir la marea impulsada velocidad litoral. Las tarifas de transporte calculados producidos por el CROSMOR-modelo para diferentes tamaños de grano y pendiente, se han utilizado para determinar explícitamente estos efectos.

Los resultados se han utilizado para determinar una fórmula simplificada para el transporte longitudinal de sedimentos es la siguiente:

$$Q_{t,mass} = 42K_{swell}K_{grain}K_{slope}(H_{s,br})^{2.5}V_{eff,L}$$

Con:

- $Q_{t,mass}$  = transporte longitudinal de sedimentos (en kg / s, masa seca);
- $H_{s,br}$  = altura de ola significativa en breakerline (m);
- $V_{eff,L} = [(V_{wave,L})^2 + (V_{tide,L})^2]^{0.5}$  = velocidad longitudinal efectiva a mitad de surf zona (m / s) para la velocidad de las mareas y velocidad inducida de onda en el misma dirección (signo menos para condiciones opuestas);
- $V_{wave,L} = 0,3 (gH_{s,br})^{0.5} \sin(2\theta_{br})$  = velocidad longitudinal inducido por las olas en zona de rompientes (incluido el efecto del viento.);
- $V_{tide,L}$  = velocidad longitudinal a mediados zona de surf, debido a forzamientos de mareas (= 0 para los casos que no son de marea; 0,1 m / s para los micro-marea, 0,3 m / s para meso-mareal y 0,5 m / s para los casos macro-marea);
- $\theta_{br}$  = ángulo de incidencia de la onda en el breakerline (para apuntalar la normalidad; en grados);
- $K_{swell} = T_{swell} / T_{ref}$  = factor de corrección de oleaje tipo swell para olas oleaje <2 m, con  $T_{ref}$  = onda de referencia del período = 6 s;  $K_{swell} = 1$  para las olas de viento;
- $K_{grain} = d_{50ref} / d_{50}$  = factor de corrección del tamaño de partícula con  $d_{50}$  en mm,  $d_{50ref}$  (= 0.2 mm), con  $K_{grain,min} = 0.1$  para  $d_{50} > 2$  mm;
- $K_{slope} = (\tan \beta / \tan \beta_{ref})^2$  = factor de corrección de pendiente del lecho  
 $K_{slope,max} = 1,25$ ,  $K_{slope,min} = 0,75$ ,  $\tan \beta$  = pendiente del lecho,  
 $\tan \beta_{ref} = 0,01$ ; (pendiente de referencia del perfil Egmond) en general la pendiente del perfil se define como la pendiente entre la línea de flotación y la 8 m contorno de profundidad; bronceado  $\tan \beta = 8 / B$  con  $B$  = distancia entre la línea de flotación y la ubicación de 8 m contorno de profundidad hacia el mar de la barra interruptor externo; la playa pendiente de la interna

Para una velocidad de marea cero ( $V_{tide,L} = 0$  m / s), el resultado es:

$$Q_{t,mass} = 40K_{swell}K_{grain}K_{slope}(H_{s,br})^3 \sin(2\theta_{br})$$

Suponiendo una costa uniforme recta con curvas de profundidad paralelas, la profundidad del agua en la línea de rotura (lugar donde el 5% de las olas están rompiendo) puede ser estimarse a partir de:

$$h_{br} = [(H_{s,o}^2 c_o \cos \theta_o) / (\alpha \gamma^2 g^{0.5})]^{0.4}$$

El ángulo de incidencia de la onda en el línea de rotura breakerline  $\theta_{br}$  se puede determinar a partir de:

$$\sin(2\theta_{br}) = (c_{br}/c_o) \sin \theta_o$$

Con:

- $H_{s,o}$  = altura de ola significativa en aguas profundas,
- $c_o, c_{br}$  = velocidad de propagación de ondas en aguas profundas y en breakerline,
- $\theta_o, \theta_{br}$  = ángulo de incidencia de la onda (para apuntalar normal) en aguas profundas y en breakerline,
- $\gamma = (H_{s,br}/h_{br})$  = ruptura
- $\alpha = 1,8$ , coeficiente de calibración,
- $L_o = (g/2\pi)T_p^2$  = longitud de onda en aguas profundas.

En resumen, la fórmula empírica de CERC es principalmente válido para tamaños de grano entre 200 y 600  $\mu m$  en condiciones con muy pequeños flujos de marea. Las Influencias de tamaño de grano y pendiente del fondo no se toman en cuenta. Conforme a Komar (1988), Dean (1988, 2002), Del Valle et al. (1993) y King (2005), el K-coeficiente es aproximadamente proporcional a  $1 / d_{50}$ . Por lo tanto,  $Q_t \approx (d_{50})^{-1}$ , que es de acuerdo con el coeficiente de  $K_{grain}$ -VAN RIJN

La fórmula de Kamphuis (1991) se obtiene:  $Q_t \approx (\tan \beta)^{0.75} (d_{50})^{-0.25}$ , lo que significa que el transporte litoral disminuye con el aumento de tamaño de grano y aumenta con aumentando pendiente del fondo.

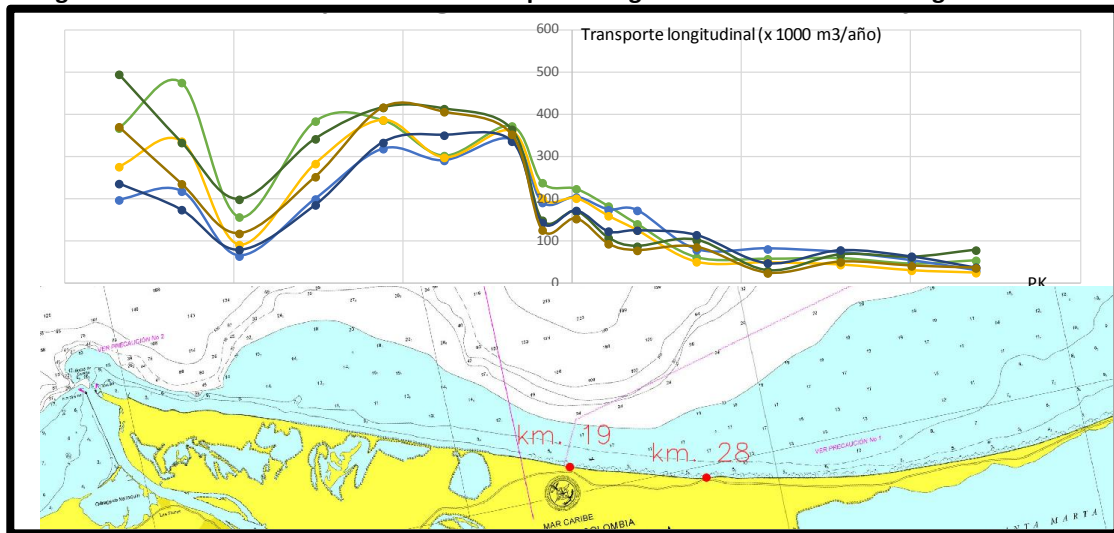
La fórmula de Van Rijn (la 2001, 2002) se obtiene:  $Q_t \approx (\tan \beta)^{0.5} (d_{50})^{-1}$ .

La Tabla 2-15, muestra los resultados obtenidos de las tasas anuales del transporte longitudinal neto para los años 2009 a 2013 (5 años completos), considerando las correspondientes orientaciones de la costa en cada uno de los tramos costeros.

**Tabla 2-15. Cálculo de tasas neta de transporte de sedimentos.**

Boya Virtual	Abscisas (m)	CERC	Kamphuis	Van Rijn
7	24	85	29	25
5	16	92	72	44
4	12	90	81	49
3	7	96	79	51
2	4	118	172	126
1	2	153	174	160
0	0	188	204	201
-1	-2	200	191	201
-7	-23	741	218	336
-2	-4	313	341	360
-3	-8	472	291	298
-4	-11	602	319	387
-5	-15	599	199	283
-6	-20	245	64	92
-8	-27	573	197	276

A pesar de la disparidad de los resultados numéricos obtenidos en las distintas formulaciones, es interesante observar que todas ellas indican que el transporte longitudinal neto de sedimentos (hacia el Oeste) y crece a medida que se avanza hacia el Oeste desde K30 donde son pequeños hasta el K0 y así sucesivamente hasta Bocas de Cenizas donde se está depositando por efecto de las estructuras que componen a Bocas de Cenizas (K30). (Ver Figura 2-111

**Figura 2-111. Variación de las tasas de transporte longitudinal neto anual a lo largo de la costa.**

Fuente: Propia.

## 2.6. CONCLUSIONES DE LA DIAGNOSIS

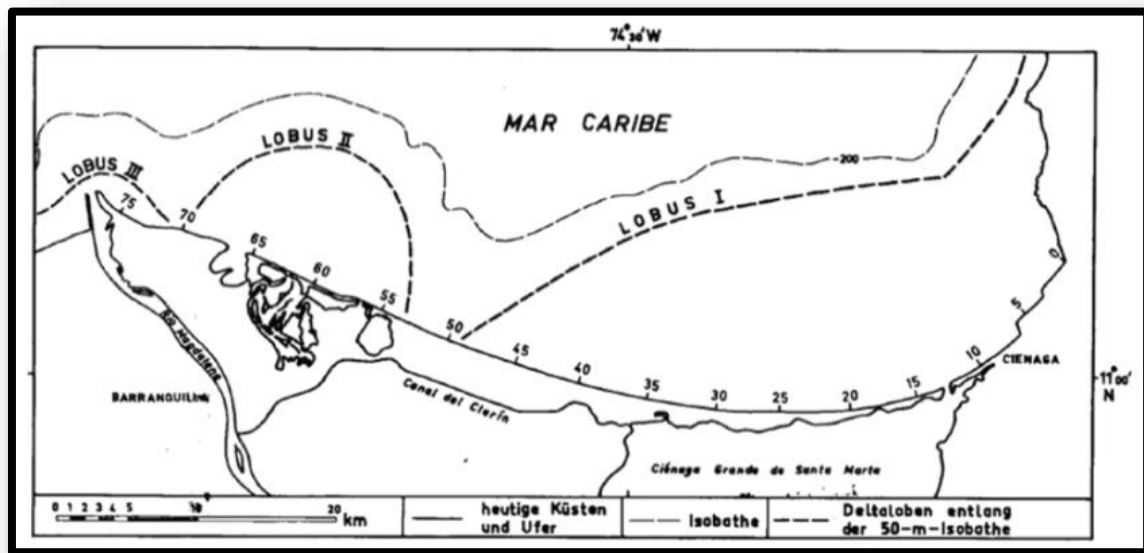
En este apartado, se muestra las conclusiones de la diagnosis a partir de los estudios detallados que fueron presentados anteriormente.

Los análisis están referenciados, a los sectores definidos en la localización del proyecto con K0 (KM-19 de la vía ruta 90), abscisas positivas hacia Pueblo Viejo (K+30) y negativas a Bocas de Cenizas (K-30):

### 2.6.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

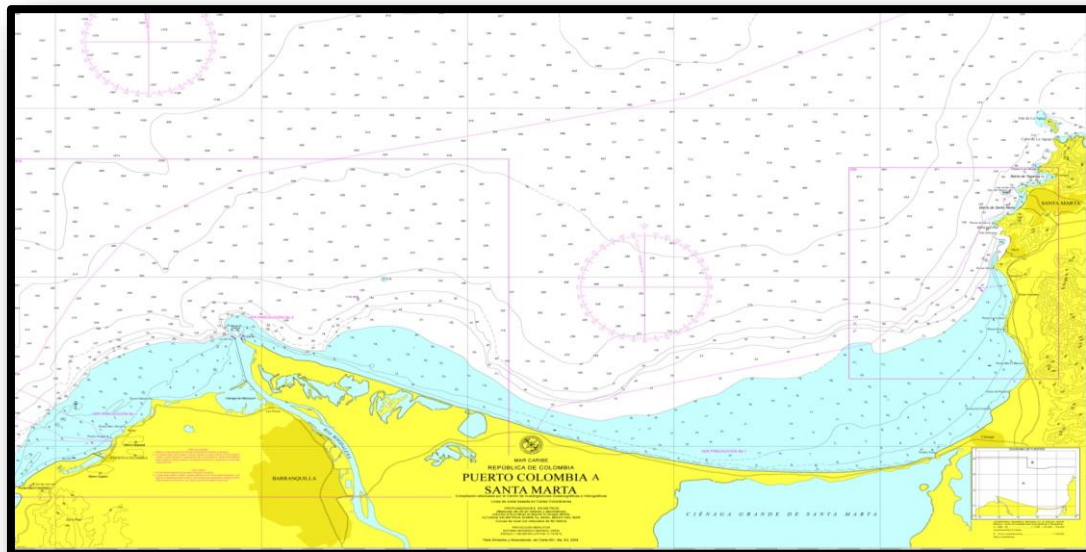
- En su génesis, la zona de estudio, al ser conformada por el antiguo delta del río Magdalena, presenta rasgos propios que influyen en la morfodinámica de la barra. El caso de la existencia de los lóbulos identificados como I y II (figura 2-112), hace que esta zona de profundidades someras influyan directamente en los cambios morfológicos como se observa en la carta náutica presentada en la figura 2-113.

Figura 2-112. Presencia de Lóbulos en el sector de la Isla de Salamanca



Fuente: Von Erffa

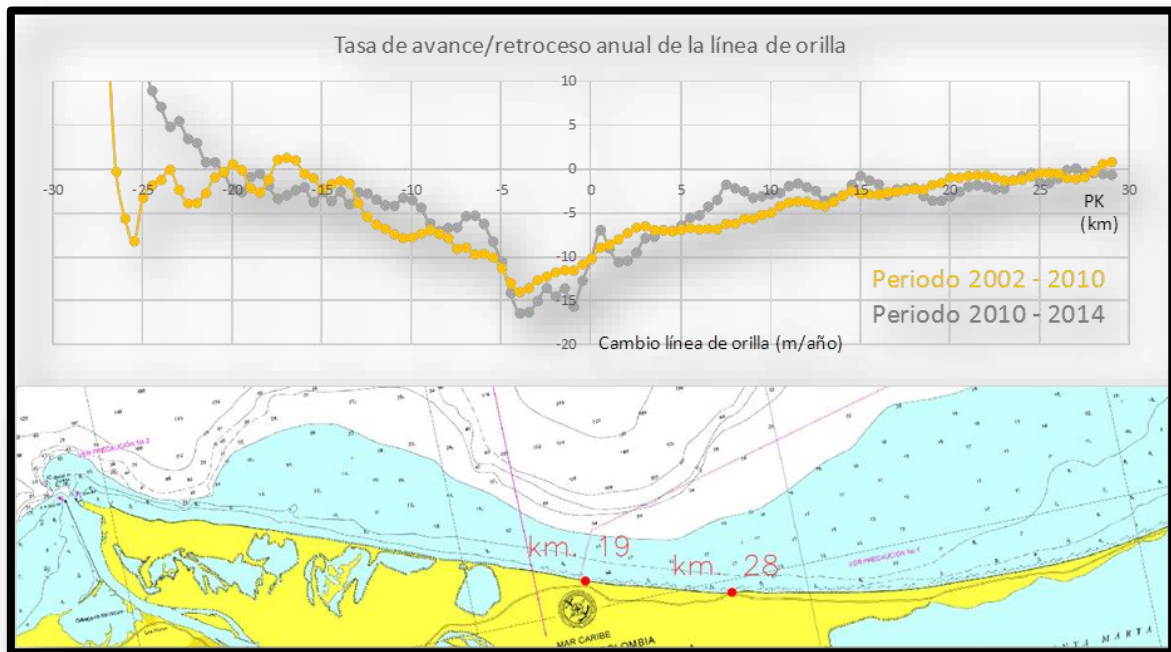
Figura 2-113. Carta náutica y batimetría de la zona



Fuente: Dimar.

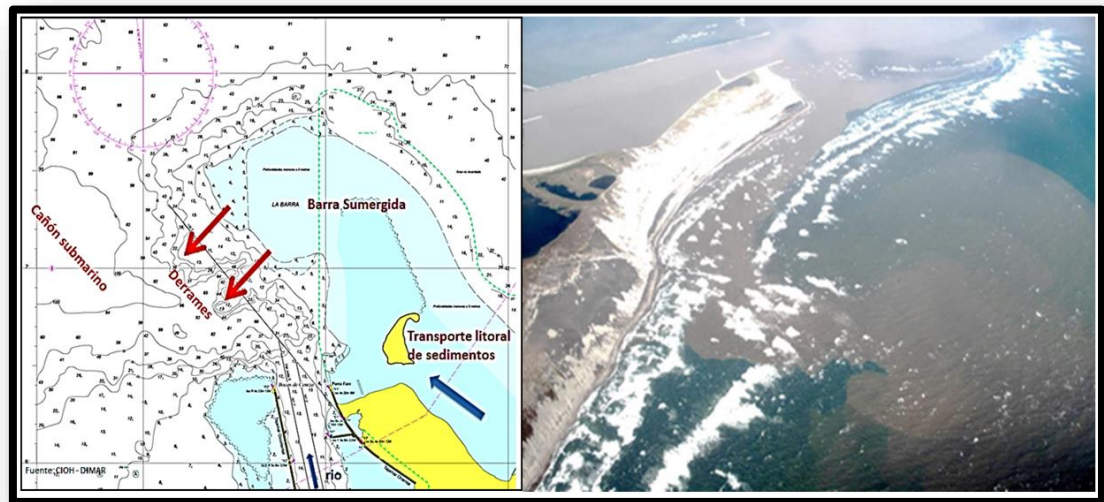


- El sistema del “Vía Parque Isla de Salamanca” a pesar de ser parque nacional y zona Ramsar, en presencia de la infraestructura del país (vía ruta 90, Estructuras Bocas de cenizas, gasoducto, cable fibra óptica entre otros), hace que pase a ser un sistema intervenido. Por ejemplo, a pesar de que está identificada una dinámica natural de retroceso (erosiva) de la barra, la presencia en sí mismo de esta infraestructura la modifica. En los últimos años ha sido muy publicitado el sector del KM-19, en donde a causa de la erosión está en riesgo la permanencia de la vía (ruta 90), la ejecución de obras de ingeniería para defender la infraestructura puede producir efectos en la barra que modifican o aceleran los procesos erosivos en las zonas no intervenidas.
- Los análisis de la variación de la línea de costa para diferentes periodos 1900-1940, 1953-2013, 2002-2014, muestra que la barra ha estado retrocediendo desde hace más de 100 años, y sin duda, también antes de este periodo. La construcción de la vía (ruta90), infraestructura y poblaciones que, por su trazado o ubicación, se colocaron próxima a la costa fue lo que alertó a las entidades gubernamentales sobre el proceso, pero es entendido de que éste es un comportamiento natural asociado a la dinámica de la barra.
- El análisis de la evolución de la costa en los últimos 15 años (Figura 2-114), muestra que la erosión en la barra es variable referido a los siguientes tramos:
  - En su extremo Este, desde el K+30 al K+25, la erosión es poco importante y en todo caso pequeña (tasa media de retroceso inferior a 2 m/año).
  - Más hacia el oeste, desde el K+25 hasta el K-5, el proceso erosivo se incrementa a medida que avanzamos hacia el oeste, alcanzando una tasa de retroceso máxima de 15 m/año en el K-5.
  - Entre el K-5 y K-20, la erosión se va reduciendo a medida que se avanza hacia el oeste, hasta ser casi nula en el K-20.
  - Al oeste del K-20 se observa una sedimentación, y correspondiente avance de la línea de costa, que se incrementa hacia el oeste, siendo máxima al extremo en el tajamar oriental de Bocas de Ceniza.

**Figura 2-114. Variación de la línea de costa en los periodos 2002-2010 y 2010-2014.**

Fuente: Fotografías Google Earth georeferenciadas.

- La forma en planta de la costa denota que el sistema está evolucionando por el crecimiento de la barra marina en Bocas de Cenizas, causado por el transporte longitudinal de sedimentos de Este a Oeste. El crecimiento de la barra marina en Bocas de cenizas es un problema para la zona portuaria de Barranquilla, debido a que la barra presenta derrames hacia al canal navegable, afectando la navegación. Ver Figura 2-115

**Figura 2-115. Barra marina en Bocas de Cenizas.**

*Fuente: Propia.*

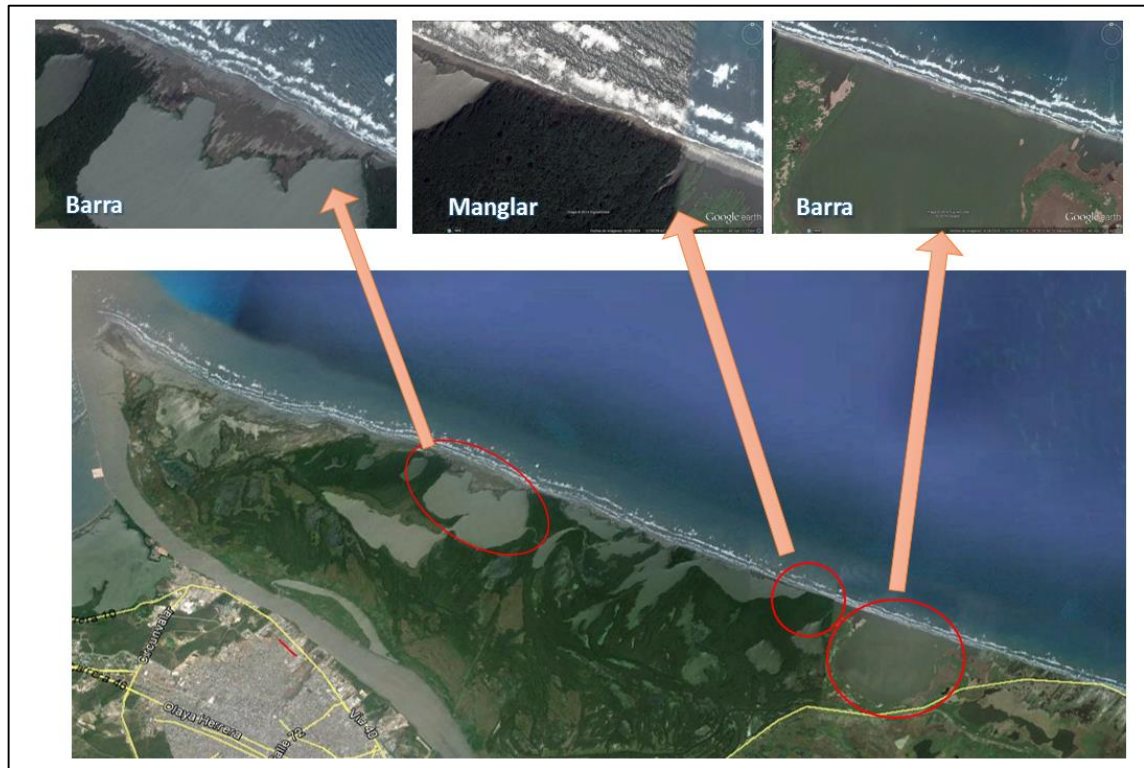
## 2.6.2. CAUSAS DEL RETROCESO DE LA LINEA DE COSTA

Las causas del retroceso de la línea de costa, se deben a dos procesos bien identificados: el que tiene que ver con el retroceso de la barra por la acción directa del oleaje cuando se presenta grandes temporales, que sobrepasan la baja cota de la barra, y el asociado a la variación del transporte longitudinal de sedimentos.

### 1. Dinámica del perfil de la barra:

- Gran parte de la franja litoral de la barra en estudio está formada por cordones dunares de reducida cota de coronación, muy susceptibles a retroceder frente a la acción del oleaje (dinámica transversal). Ver Figura 2-116.
- La numerosa presencia de cordones litorales formados por barras dunares con baja cota de coronación en la morfodinámica costera apunta que la línea de costa puede también retroceder frente a la acción del oleaje sobre todo cuando se presenta grandes temporales (fenómeno de “overwash”), sin que exista una pérdida neta del sedimento en el perfil completo de playa.

**Figura 2-116. Rasgos morfodinámicos en cordones litorales presentes en la barra.**



*Fuente: Propia.*

- Estudio del efecto del perfil de playa debido al proceso de “overwash” en los cambios morfológicos de la costa, es un tema complejo de evaluar, sobre todo en este caso en el cual no se cuenta con información topográfica y batimétrica de detalle de toda la zona en estudio.

## 2. Variaciones del transporte longitudinal de sedimentos.

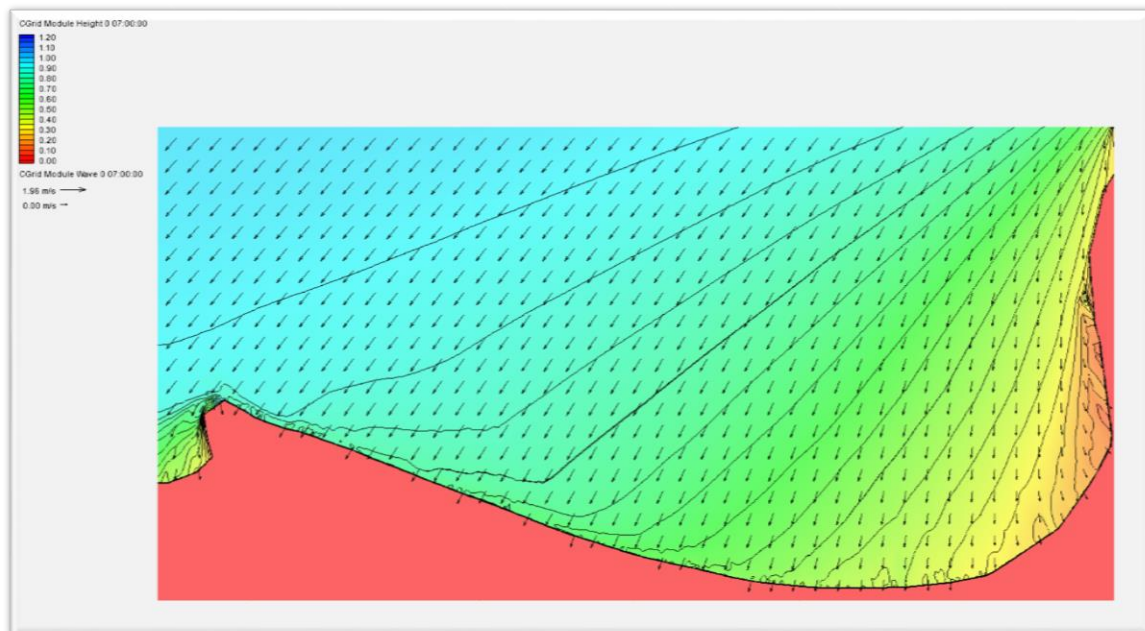
Los principales efectos sobre la morfología costera de la barra, se deben a la variación del transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la costa, a continuación se presenta los comentarios más relevantes:

## Oleaje

- El oleaje es el principal responsable del transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la costa.

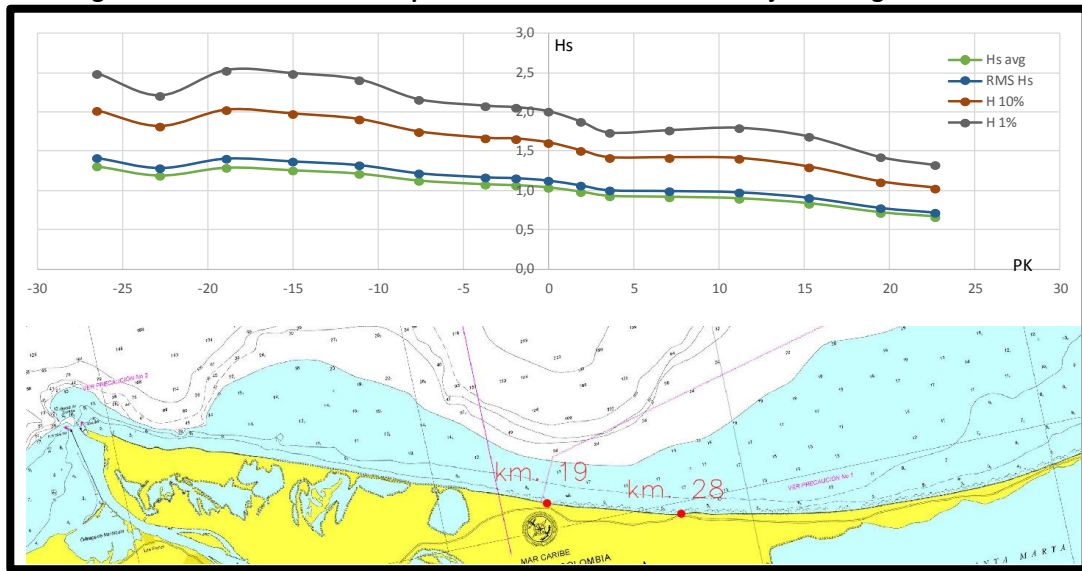
- La presencia de la zona de baja profundidad y la zona somera (lóbulos I y II) producto del antiguo delta del río Magdalena, incide notablemente en la transformación del oleaje a medida que se propaga hacia la costa (refracción, difracción, shoaling, etc.), de tal manera que se produce una distribución irregular de las condiciones del oleaje a lo largo de la costa en estudio.
- Los oleajes predominantes (mayor al 95 %) desde aguas profundas en dirección del cuadrante Norte-Este, muestra que a medida que se acerca a la costa son afectados por efectos de difracción del promontorio donde se ubica la ciudad de Santa Marta, de tal manera que la energía del oleaje crece a medida que se avanza por la costa en estudio de Este a Oeste (Ver Figura 2-117 y figura 2-118)

**Figura 2-117. Distribución del coeficiente adimensional de propagación  $K_p=H_s/H_{s,o}$  y del ángulo medio de incidencia. Oleaje sector NE.  $H_{s,o}=1,0$  m.  $T_p=5$  s.**



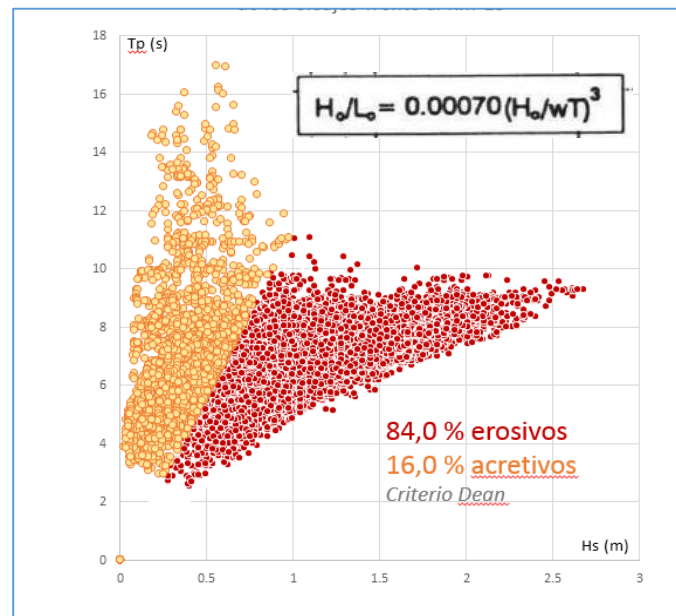
*Fuente: Propia.*



**Figura 2-118. Variación de los parámetros estadísticos del oleaje a lo largo de la costa**

Fuente: Propia.

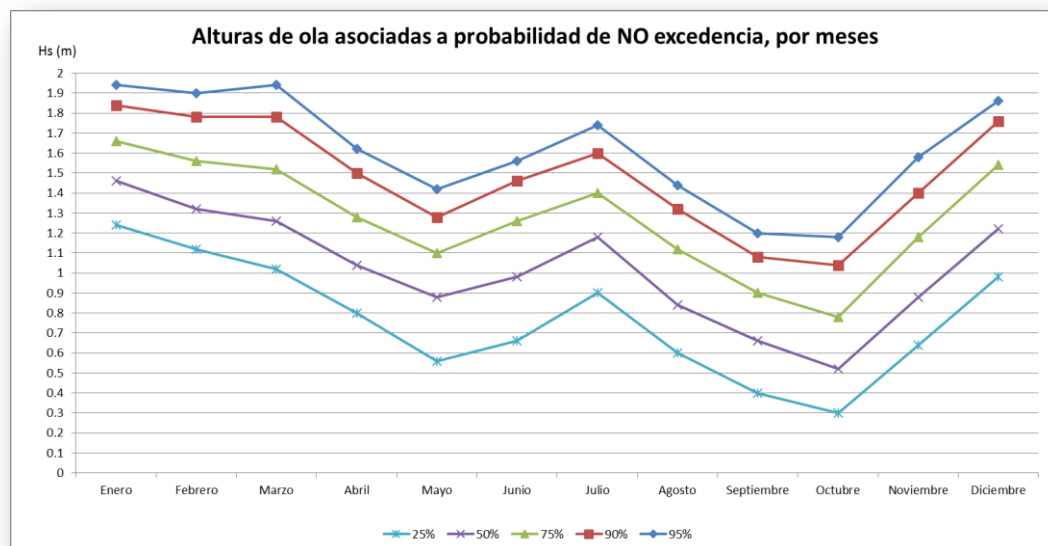
- El análisis del clima marítimo muestra la predominancia de oleajes tipo SEA, lo que implica que son más erosivos. Un análisis realizado a partir de un predictor de erosión/acreción (parámetro de DEAN) muestra que los oleajes que llegan a la zona de estudio son en un 84 % de tipo erosivos y un 16% acretivos. Ver Figura 2-119

**Figura 2-119. Diagrama de dispersión Hs – Tp y caracterización de los oleajes en la zona de estudio.**

Fuente: Propia.

- Con relación a la frecuencia de presentación mensual de oleajes, las mayores alturas se presenta en la época de vientos alisios entre diciembre a principios de marzo, periodo en el cual se produce los mayores procesos erosivos, luego hay dos meses de menor intensidad entre abril a mayo, para los meses de junio a julio nuevamente se produce un aumento en la alturas de ola. Luego hay un decrecimiento de la altura del oleaje desde agostos a octubre. Para los meses de noviembre a diciembre, inicia nuevamente el aumento hacia las mayores alturas de ola. Como aspecto relevante es que hay muy pocas calmas, y las alturas de olas siempre son significativas por lo cual denota para todo al año climático existe un oleaje incidente que produce una alta dinámica. Figura 2-120.

**Figura 2-120. Régimen medio de la altura de ola, por meses**



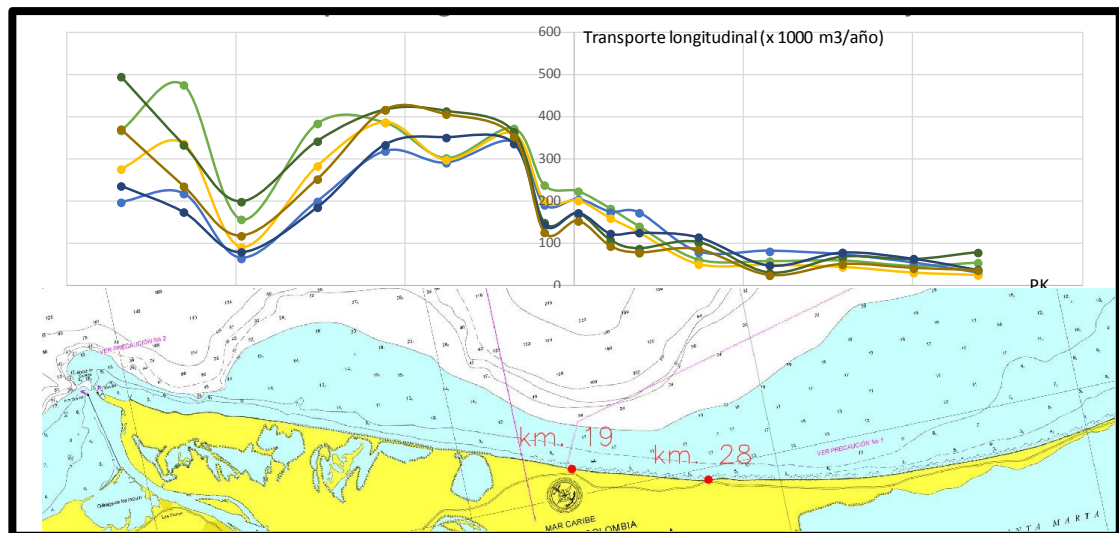
*Fuente: Propia.*

- En lo que tiene que ver con el régimen extremal del oleaje, asociado a eventos de alta capacidad erosiva por algún tipo de temporal o mar de leva, se observa que en su mayoría provienen de Norte – Este y llegan a la costa perpendiculares con altura de olas que puede alcanzar valores desde 2.4 m hasta 3.0 m. Existe oleajes que también puede presentarse atípicamente en dirección NW, pero no son significativos debido a la desembocadura del río Magdalena ayuda a que sean difractados disminuyendo su intensidad.

### Variaciones en el transporte de sedimentos

- La variabilidad de las condiciones del oleaje (altura de ola y dirección) y de la orientación de la línea de costa a lo largo de la barra, muestra que existe un fuerte patrón de dirección del transporte de sedimento neto de este a oeste, aumentando a medida que se avanza hacia el oeste.
- El cálculo de la tasa de transporte de sedimentos muestra cómo crece a medida que se avanza hacia el oeste, desde K+30 donde son pequeños hasta el K0 y así sucesivamente hasta Bocas de Cenizas. Es interesante ver el efecto del lóbulo II (K-5 a K-18), en donde el transporte de sedimento presenta los mayores valores que corresponde significativamente con las zonas de mayor erosión identificadas anteriormente. Finalizando este tramo, se evidencia un decaimiento del transporte hacia el KM-20, luego se acelera hacia la zona acumulativa por efecto de la estructura del tajamar de Bocas de Cenizas. Ver Figura 2-121

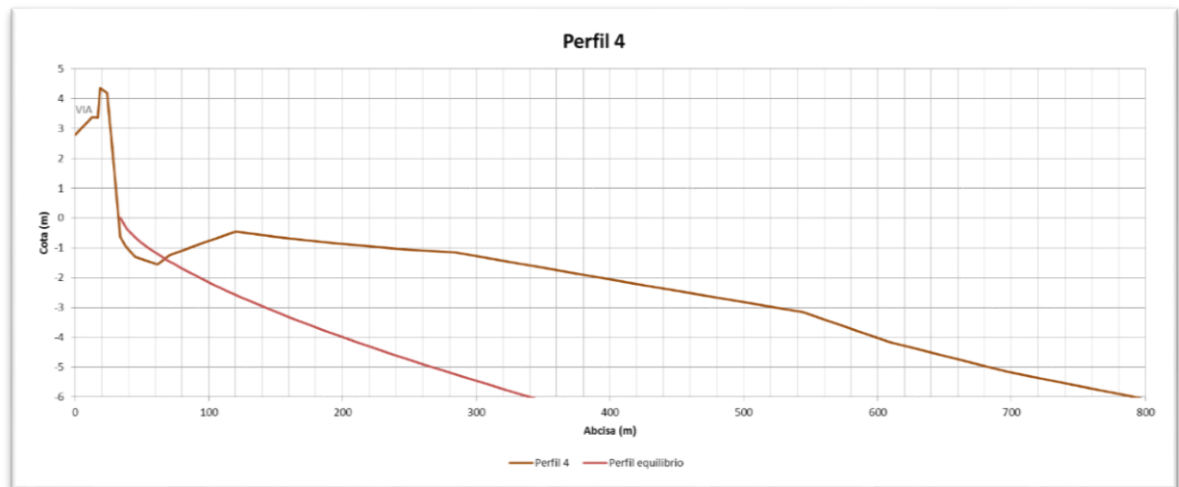
**Figura 2-121. Variación de las tasas de transporte longitudinal neto anual a lo largo de la costa.**



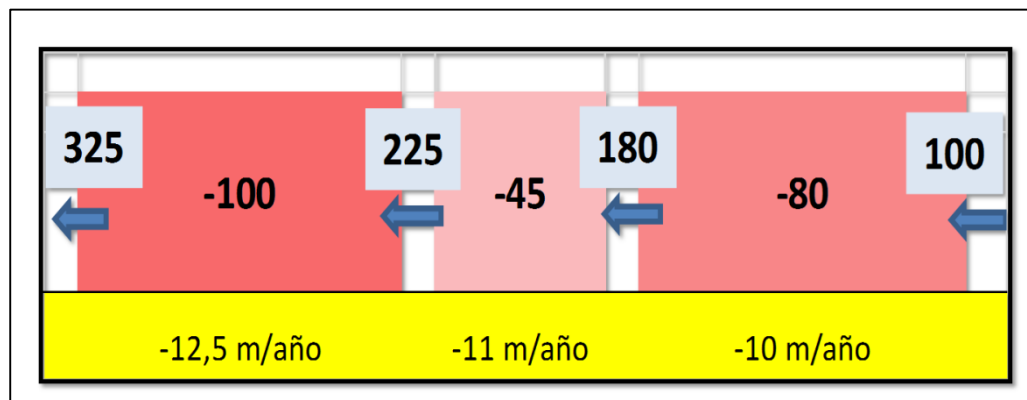
Fuente: Propia.

- El perfil representativo para el tramo de mayor erosión en el sector de K0, denota que no hay ajuste al perfil de equilibrio, y que tiene una condición rara debido a que aparece una barra sumergida, que no permite que el perfil de playa activo se desarrolle en toda su longitud (profundidad), mostrándose un perfil de playa apoyado sobre una plataforma de profundidad reducida (variable, entre -1.5 m y -2.5 m). Figura 2-122.



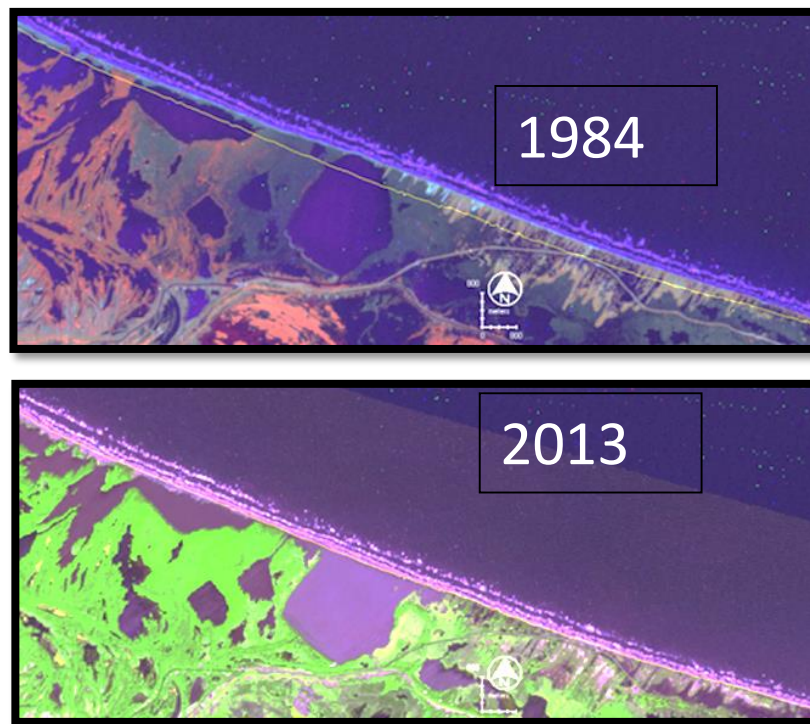
**Figura 2-122. Comparativo Perfil 4 medido Vs Perfil de equilibrio de Dean (D50= 0.3 mm).**

- Los perfiles muestran que para el caso del tramo donde se presenta menos erosión (cercanos al K+30) están muy cerca de la condición de equilibrio.
- Para entender cómo influye la variación del transporte longitudinal de sedimentos en el retroceso de la línea de costa, se presenta un análisis a través un balance sedimentario representativo en un tramo de 5 km de longitud alrededor del K0 mediante un “Box Model”, que analiza el balance sedimentario en 3 celdas: la central (K0) de 1 km de longitud y 2 celdas adyacentes de 2 km de longitud. En este análisis se calcula el balance neto de sedimentos (flujo entrante menos flujo saliente) y su correspondiente avance/retroceso de la línea de costa, considerando una altura del perfil activo de la playa de 4 m (1.5 m emergida y 2.5 sumergida). Ver Figura 2-123

**Figura 2-123. Modelo representativo de cajas (“Box Model”). Tramo del K0.**

- Un aspecto interesante es el mecanismo natural del sistema para adaptarse ante la presentación de los procesos erosivos asociados a la energía del oleaje. La figura 2-124, muestra las fotografías aéreas del tramo de mayor erosión de los años 1984 y 2013, donde se observa claramente un evento de retroceso de la línea de costa. A pesar que la línea de costa ha retrocedido se produce un reajuste de las lagunas y ciénagas que se encuentran tras ella, sin que la barra se rompa totalmente, aunque puede hacerlo puntualmente (p.ej. tras un fuerte temporal) pero cerrándose posteriormente debido al efecto de la intensa deriva litoral de sedimentos.

**Figura 2-124. Variación de la línea de costa entre 1984 – 2013 en el kilómetro 19**



**Fuente:** UNINORTE G. Vargas.

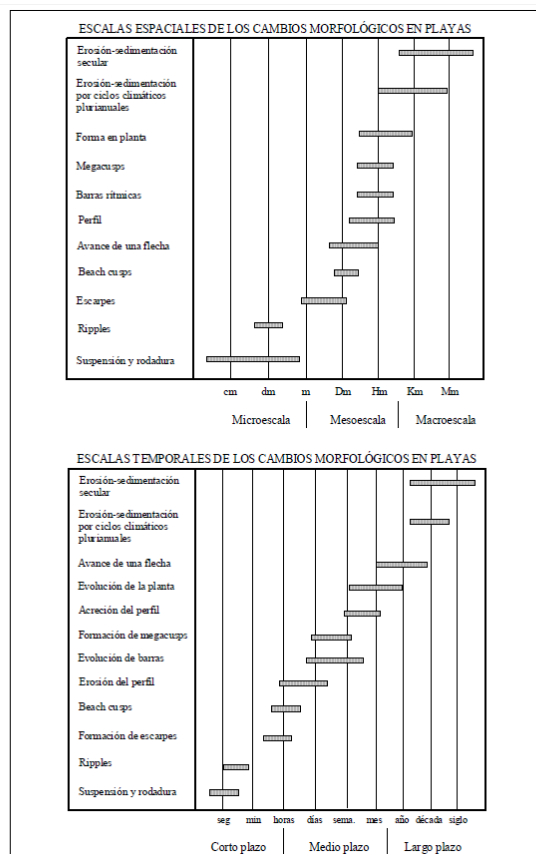
### **3. ANALISIS MORFODINAMICO DE LA BARRA A TRAVES DE LA PROGNOSIS**

El estudio de la prognosis, definirá las condiciones a futuro que se pueden presentar en la línea de costa en estudio, que forma la barra de Salamanca en un estado de largo plazo. El estudio, se realizará a través de los análisis de la forma en planta de equilibrio y el uso de un modelo de una línea (Génesis).

#### **3.1. GENERALIDADES**

El estado del conocimiento de la dinámica de la zona de rompientes de las playas se encuentra en desarrollo en la actualidad. La modelación del flujo y del transporte de sedimentos en la zona de rompientes, sólo se puede realizar imponiendo numerosas simplificaciones. Como resultado, aún en el supuesto de que las acciones sean conocidas, no existe ningún modelo que sea capaz de predecir las variaciones de evolución tridimensional de playas a corto, medio y largo plazo en el tiempo y de pequeña y media escala en el espacio. En la actualidad, los modelos numéricos de evolución de playa, modelos de una línea, de varias líneas o modelos bidimensionales integrados en vertical, son aplicables a análisis a largo plazo y gran escala, y sólo fiables en el caso de que se alcance algún tipo de equilibrio en el que los caudales de transporte de sedimento sean pequeños. Por otro lado, aún en el caso de que los modelos de evolución morfodinámica fueran fiables, quedaría por resolver la naturaleza aleatoria de las acciones. Queda claro que cualquier modelo de evolución de playas tiene que tener en cuenta esta aleatoriedad, mediante el adecuado tratamiento estadístico de las variables de entrada y de los resultados. (Medina y Vidal 2001).

Para ejecutar el estudio de la prognosis, se realizará un análisis a tal forma de determinar la tendencia de la costa, para diferentes escalas de tiempo. Las escalas morfológicas está sujeta la valoración espacio - tiempo. La figura 3-1, muestra como sugerencia las diferentes escalas típicas basadas en los procesos que se estén evaluando.

**Figura 3-1. Escalas espaciales y temporales típicas para algunos cambios morfológicos.**

Fuente: Vidal y Losada, 2001.

### 3.1.1. Análisis de la playa de equilibrio.

Un aspecto importante a estudiar corresponde a la playa de equilibrio, de esta manera podemos entender a partir de los resultados del modelo para diferentes escalas de tiempo, y si la barra está próxima al equilibrio o cuánto falta para llegar a este estado.

La “playa de equilibrio”, se entiende la configuración a la que tiende la forma de la playa bajo condiciones estacionarias de la dinámica actuante. Si bien en sentido estricto esta configuración de equilibrio no existe en la naturaleza, puesto que no existe dicha condición estacionaria, este concepto “ideal” de una playa es ampliamente usado puesto que permite tener una representación aproximada, pero fiel, de la morfología de la misma. La “playa de equilibrio” queda definida su perfil de equilibrio y planta de equilibrio. (Medina y Vidal, 2001).

### 3.1.2. Forma en planta de equilibrio

Un aspecto importante a estudiar corresponde a la playa de equilibrio, de esta manera podemos entender a partir de los resultados del modelo para diferentes escalas de tiempo, y si la barra está próxima al equilibrio o cuánto falta para llegar a este estado.

La “playa de equilibrio”, se entiende la configuración a la que tiende la forma de la playa bajo condiciones estacionarias de la dinámica actuante. Si bien en sentido estricto esta configuración de equilibrio no existe en la naturaleza, puesto que no existe dicha condición estacionaria, este concepto “ideal” de una playa es ampliamente usado puesto que permite tener una representación aproximada, pero fiel, de la morfología de la misma. La “playa de equilibrio” queda definida su perfil de equilibrio y planta de equilibrio. (Medina y Vidal, 2001).

La forma en planta de las playas ha sido un tema que ha atraído la atención de numerosos investigadores que han reconocido la existencia de un patrón en la forma de las playas ubicadas al abrigo de un cabo o saliente. Sin embargo, puede considerarse que son los trabajos de Silvester (1960), quien realizó ensayos en un modelo físico de una playa recta encajada entre dos obstáculos bajo la influencia de un oleaje a 45° sin el suministro adicional de sedimentos, los que señalan el comienzo de una serie de formulaciones tendentes a proporcionar una expresión para representar las formas en planta de playas formadas al resguardo de obstáculos.

Como continuación a estos trabajos, diversos investigadores realizaron ensayos en laboratorio con el objetivo de determinar la forma en planta de una playa sometida a un oleaje estacionario (e.g. Vichetpan 1969; Ho, 1971). Con base en estos ensayos Silvester propuso una formulación, basada en la espiral logarítmica, como una primera aproximación a la forma en planta de una playa en equilibrio con el oleaje incidente.

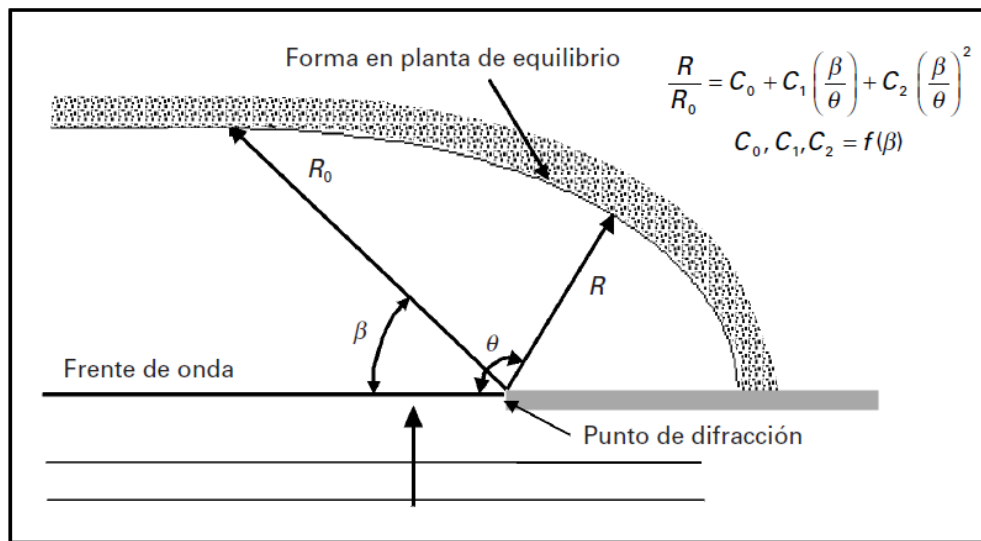
Silvester intentó durante muchos años desarrollar una técnica de diseño con la espiral logarítmica, pero no obtuvo el éxito deseado debido, entre otras razones, a la dificultad de ubicación del polo de la espiral, el cual no estaba definido, y al pobre ajuste de la espiral logarítmica a la zona alejada de la playa. En ese sentido Hsu et al. (1987) mostraron, analizando de nuevo los datos experimentales de playas encajadas en equilibrio, que las espirales logarítmicas, cuando su origen coincidía con el punto de control, ajustaban bien a la zona curva de la línea de costa, detrás del punto de control «aguas arriba», pero se desviaba en la parte recta en la zona «aguas abajo». (Medina y Vidal, 2001).

Es por ello, que posteriormente Hsu y Evans (1989), propusieron como curva de mejor ajuste a los datos medido, una función parabólica del tipo:

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left( \frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left( \frac{\beta}{\theta} \right)^2 \quad (18)$$

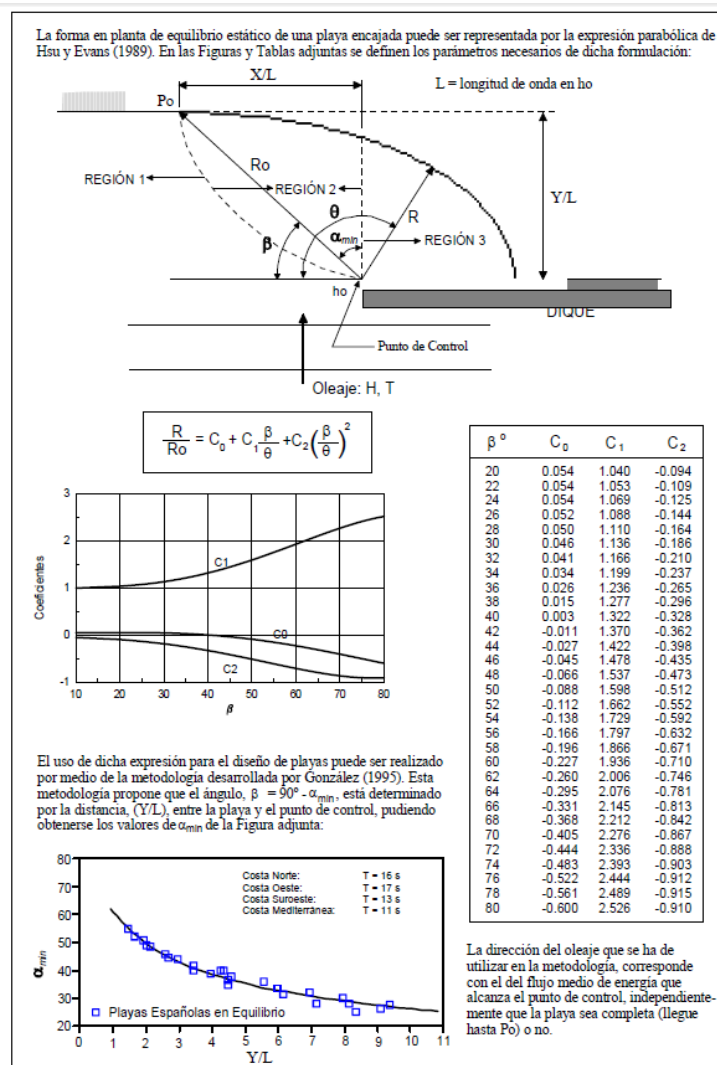
Donde  $R_0$ ,  $\beta$  y  $\theta$  son variables geométricas representadas en Figura 3-2 y  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  son coeficientes que dependen de  $\beta$ .

**Figura 3-2. Forma en planta de equilibrio.**



Fuente: Hsu y Evans (1989).

González et. al. (1995), plantea una metodología para el diseño de playas encajadas a partir de la formulación de Hsu. En el método desarrollado  $b = 90 - \alpha_{min}$  (ángulo que define el límite entre las zonas 1 y 2 en el punto  $P_0$ ), es función de: el número de longitudes de onda o distancia adimensional que exista hasta la línea de costa ( $Y/L$ ), siendo  $Y$  la distancia a la línea de costa y  $L$  la longitud de onda y la dirección del frente del oleaje, que corresponde con la dirección del flujo medio de energía en la zona del polo de difracción (punto de control). La Figura 3-3, presenta la metodología de cálculo para determinar la forma de la playa.

**Figura 3-3. Metodología de cálculo de una playa en equilibrio.**

Fuente: González et. al. (1995).

### 3.2. DETERMINACION DE LA FORMA EN PLANTA DE EQUILIBRIO PARA LA ZONA DE ESTUDIO

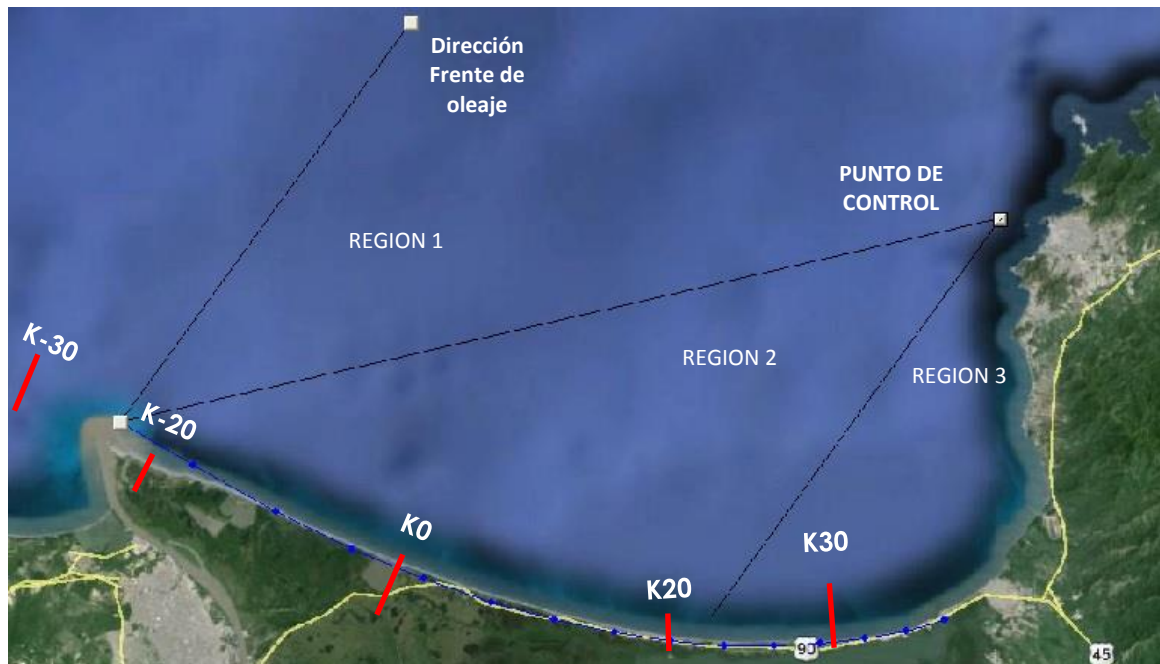
La forma en planta de equilibrio, consiste en definir una aproximación de la forma en planta de la costa, cuando la orientación de la línea de costa coincida perpendicularmente a los flujos medios de energía por efecto del oleaje, siguiendo las hipótesis de Hsu- Evans.

Los estudios muestran que el sector del morro donde se ubica la ciudad de San Marta, influye en la difracción de oleaje, a tal manera que la zona donde se ubica el municipio de Ciénaga la playa presenta una forma encajada y luego inicia el tramo recto y cóncavo hacia Bocas de Cenizas.

El ajuste del modelo parabólico de equilibrio en planta de Hsu – Evans, se realizó con programas de apoyo, que permite interactuar con las variables de la metodología definida a tal manera de definir la forma de equilibrio en planta en función de las condiciones de oleaje. Se requiere de experiencia y conocimiento local de la zona, en la definición del punto de control donde se desarrollará la forma en planta según la teoría.

La Figura 3-4, muestra la forma en planta de equilibrio determinada para la zona de estudio, la cual se ajusta coherentemente a la tendencia actual y muestra su tendencia a medida que está evolucionando.

Figura 3-4. Planta de Equilibrio en la zona de estudio.



Fuente: Propia



Con respecto a este análisis, se presenta a continuación se presenta los siguientes comentarios:

Abscisa tramo (km)	Equilibrio	No equilibrio
K25 a K20	La línea de costa en este sector se aproxima a la condición de equilibrio.	
K20 a K15	La línea de costa en este sector se aproxima a la condición de equilibrio.	
K15 a K10		La línea de costa en este sector no se aproxima a la condición de equilibrio. Se espera retroceso de la costa actual.
K15 a K5		La línea de costa en este sector no se aproxima a la condición de equilibrio. Se espera retroceso de la costa actual.
K5 a K0		La línea de costa en este sector no se aproxima a la condición de equilibrio. Está muy alejada del orden de 300 m. Se espera retroceso de la costa actual.
K0 a K-5		La línea de costa en este sector no se aproxima a la condición de equilibrio. Hacia el K-5, por concavidad de la curva empieza a disminuir el avance del retroceso.
K-5 a K-10		La línea de costa en este sector no se aproxima a la condición de equilibrio. Hacia el K-5, por concavidad de la curva empieza a disminuir el avance del retroceso.
K-10 a K-15		Se denota un cambio en la orientación de la línea de costa que está sujeto a la variación de la zona acumulativa hacia el tajamar de Bocas de Cenizas.
K-15 a K-20		Se denota un cambio en la orientación de la línea de costa que está sujeto a la variación de la zona acumulativa hacia el tajamar de Bocas de Cenizas.
K-20 a K-25		Zona acumulativa hacia el tajamar de Bocas de Cenizas. El equilibrio de esta zona depende del equilibrio de la costa ubicada al Este.

### 3.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

#### 3.3.1. Descripción del modelo numérico.

Como fue definido en la metodología se utilizará el modelo GENESIS desarrollado por el CERC, para el estudio de la evolución de la línea de costa a largo plazo. El concepto de la modelación para determinar el pronóstico de la línea de costa en una escala de tiempo, se basa en concepto de que la forma en planta de la costa depende principalmente del valor de la relación de transporte longitudinal de sedimentos y su gradiente de variación

El modelo GENESIS a pesar de ser un modelo basado en el balance sedimentológico por gradiente de volumen, requiere de información confiable que permita inferir que la línea de costa representada en el pronóstico sea coherente para ser aceptada como válida. Esta información está relacionada con una digitalización adecuada de la línea de costa y el efecto de un buen perfil de playa que defina la profundidad activa. Para el caso de la barra en la zona de estudio y la presencia de los lóbulos vemos como se muestra más adelante que incide en la determinación del transporte y balance del modelo.

Es por esto que se requiere de información detallada y controlada en donde podamos reproducir adecuadamente el modelo con cierto grado de fiabilidad. Como fue indicado anteriormente, no se cuenta con información de detalle así como suficientes imágenes satelitales que muestren con claridad una sola línea de referente a un solo año sino por tramos.

Debido a que se cuenta con información detallada (batimetrías, topografías en tierra y granulometría) para el sector definido como K0 (K19), y líneas de costa para los años 2004, 2010 y 2014 siendo este un tramo representativo de la zona de estudio, se realizará la calibración y validación del modelo en este sector a tal manera de contar con los parámetros K1 y K2, que definen la operación del modelo.

Hay que tener en cuenta, que lo que se persigue con el modelo es determinar futuras líneas de costa basado en el flujo neto de volumen de sedimentos asociados a la condiciones de transporte, y precisamente los parámetros de calibración en sí mismo lo que definen son las tasas de transporte como respuesta a los cambios de línea de costa presentado. Es por esto, que se considera válido entonces aplicar estos parámetros para la zona en estudio, siempre y cuando se reproduzca las condiciones de transporte y dinámicas que han sido identificado en la diagnosis, de allí que este estudio en este momento sea de mucha importancia para poder reproducir las tendencia de las futuras líneas de costa.

A continuación se presenta los siguientes aspectos al fin de adaptar la herramienta de cálculo a representar la realidad de la zona de interés:

(i) Alimentación del modelo GENESIS a partir de un modelo de propagación de oleaje (CMS-wave)

Se definen frente a la costa 5 boyas virtuales -series de datos- de donde el modelo toma la información para representar adecuadamente la variación del oleaje a lo largo de la costa. Estas boyas virtuales se dan a la profundidad de 8 m y se corresponden con las descritas en el apartado de análisis de clima marítimo y representan adecuadamente la transformación del oleaje desde aguas profundas hasta las inmediaciones de la zona de rompientes.

(ii) Datos para el módulo interno de transformación de oleaje – contorno batimétrico regional

El modelo GENESIS calcula el transporte de sedimentos a partir de información de oleaje en rompiente. Para ello toma la información en las inmediaciones de la zona de rompientes (punto anterior), y analiza la rotura en un módulo interno. Una opción utilizada en los análisis que se presentan es la de introducir una dirección representativa de las curvas batimétricas, variable a lo largo de la costa, no necesariamente igual a la línea de orilla inicial o a la línea de orilla calculada en cada paso de tiempo, con objeto de suministrar información más representativa al módulo interno de transformación de oleaje. Se ha introducido, a criterio del calculista, una línea sintética representativa de las batimétricas -2.0 a -5.0 m.

(iii) Parámetros relativos al transporte de sedimentos

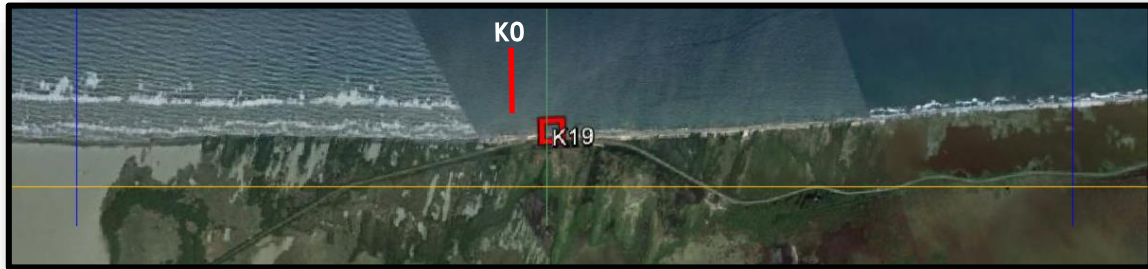
Los parámetros para cálculo transporte longitudinal: Obtenidos de los resultados de calibración y comprobados en los análisis de validación, fijadas las siguientes hipótesis:

- Cota de la berma de playa: +1.5 m.
- Profundidad de cierre del perfil activo: ver sub-apartado “Calibrado del modelo”.
- Tamaño del sedimento movilizado ( $D_{50}$ ): 0.30 mm.

(iv) Malla de simulación

Se ha tomado un dominio de simulación que abarca 9650 m de costa en total. Las coordenadas de referencia se han establecido con el origen de abscisas en el punto de interés KM19-20, correspondiente a PK19+700m de la vía. La orientación de la línea de referencia es 109.7°N. Las referencias en la dirección perpendicular toman como origen la línea de referencia marcada en los planos, con valores positivos costa afuera.

**Figura 3-5. Dominio de simulación del modelo (entre líneas azules,  $X = -4.55$  km a  $X = +5.10$  km), y ejes de coordenadas (naranja-verde).**



*Fuente: Propia.*

(v) Líneas de orilla y condiciones de contorno

Las líneas de orilla del proyecto provienen de imagen satelital y se identifican según el año de referencia:

- Marzo 2004
- Junio 2010
- Junio 2014
- Enero 2015 (para este caso se ha complementado la imagen con la topografía del proyecto).

Se han utilizado las tres (3) primeras líneas para calibrar (marzo 2004 y junio 2010) y validar (junio 2010 y junio 2014) el modelo, y la más reciente (enero 2015) para el análisis de la evolución futura.

Las condiciones de contorno se han tomado como la velocidad media de retroceso de línea de orilla en los extremos durante el periodo de calibración. La simulación de validación sirve para dar una idea del error de esta hipótesis. No se considera posible disponer de mejor información para simulaciones a futuro, donde la posición de la línea de orilla es resultado del modelo.

(vi) Limitantes del modelo Génesis

- El perfil de playa adopta una forma invariable en el tiempo y en el espacio.
- Los límites entre los que se supone que el perfil de playa se traslada son invariables en el tiempo y en el espacio (el límite en la costa viene marcado por la elevación de la berma y en el mar por la profundidad de cierre ).
- El transporte longitudinal de sedimento sólo se produce por la rotura del oleaje.

- La estructura detallada de la circulación costera se ignora.

### 3.3.2. Calibrado del modelo.

Como resultado de la calibración del modelo, se obtienen los parámetros K1, K2 de la fórmula empírica de cálculo de transporte de sedimentos utilizada en GENESIS:

$$Q = (H^2 C_g)_b \left[ a_1 \sin 2\theta_{bs} - a_2 \cos \theta_{bs} \frac{\partial H}{\partial x} \right]_b$$

$$a_1 = \frac{K_1}{16(\rho_s/\rho - 1)(1 - p)(1.416)^{5/2}}$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8(\rho_s/\rho - 1)(1 - p)\tan\beta(1.416)^{7/2}}$$

El primer término de la ecuación corresponde a la fórmula del CERC y cuantifica el transporte longitudinal producido por la rotura de oleaje incidente en la costa con cierta oblicuidad. El segundo término no es parte de la fórmula del CERC, y se utiliza para describir el efecto de otro mecanismo de generación de transporte longitudinal de sedimento: el gradiente longitudinal en altura de ola rompiente. Esta contribución es normalmente mucho menor que la anterior. Sin embargo en las inmediaciones de estructuras, donde la difracción produzca un cambio sustancial en las alturas de ola en rompiente, la inclusión de este segundo término mejora el resultado de la modelización, teniendo en cuenta la corriente debida a la diferencia de alturas de ola en rompiente. Típicamente,  $0.5 K_1 < K_2 < K_1$ . En este caso,  $K_2 \sim 0.5 K_1$ .

En el primer tanteo de calibración se tomó una profundidad de cierre de 5.5 m, ligeramente superior a la profundidad límite, en las inmediaciones de la zona de estudio. La profundidad límite está definida como aquella a partir de la cual el sedimento del fondo no experimenta movimiento. Este valor es el utilizado para relacionar el transporte de sedimentos y líneas de orilla, y está definido por la fórmula de Hallermeier (1978):

$$D_c = 2.28 H_{0.13\%} - 68.5 \left( \frac{H_{0.13\%}^2}{g T_{0.13\%}^2} \right)$$

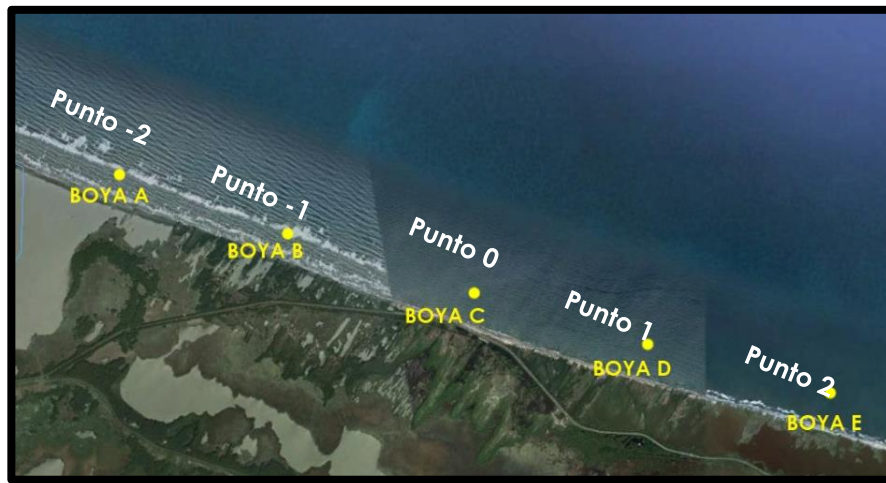
Donde:

- $D_c$  es la profundidad límite,

- $H_{0.136\%}$  es la altura de ola excedida 12h al año (1.8 m según los datos de la propagación de oleaje),
- $T_{0.136\%}$  es el periodo asociado a esta altura de ola (9 s en este caso, representativo de todos los sectores).

Para este caso, se tomaron las boyas definidas en el estudio de propagación con detalle en la zona a modelar. Del estudio del clima marítimo se tomaron las siguientes boyas en los puntos especificados. Ver Figura 3-6

**Figura 3-6. Boyas seleccionadas.**



*Fuente: Propia*

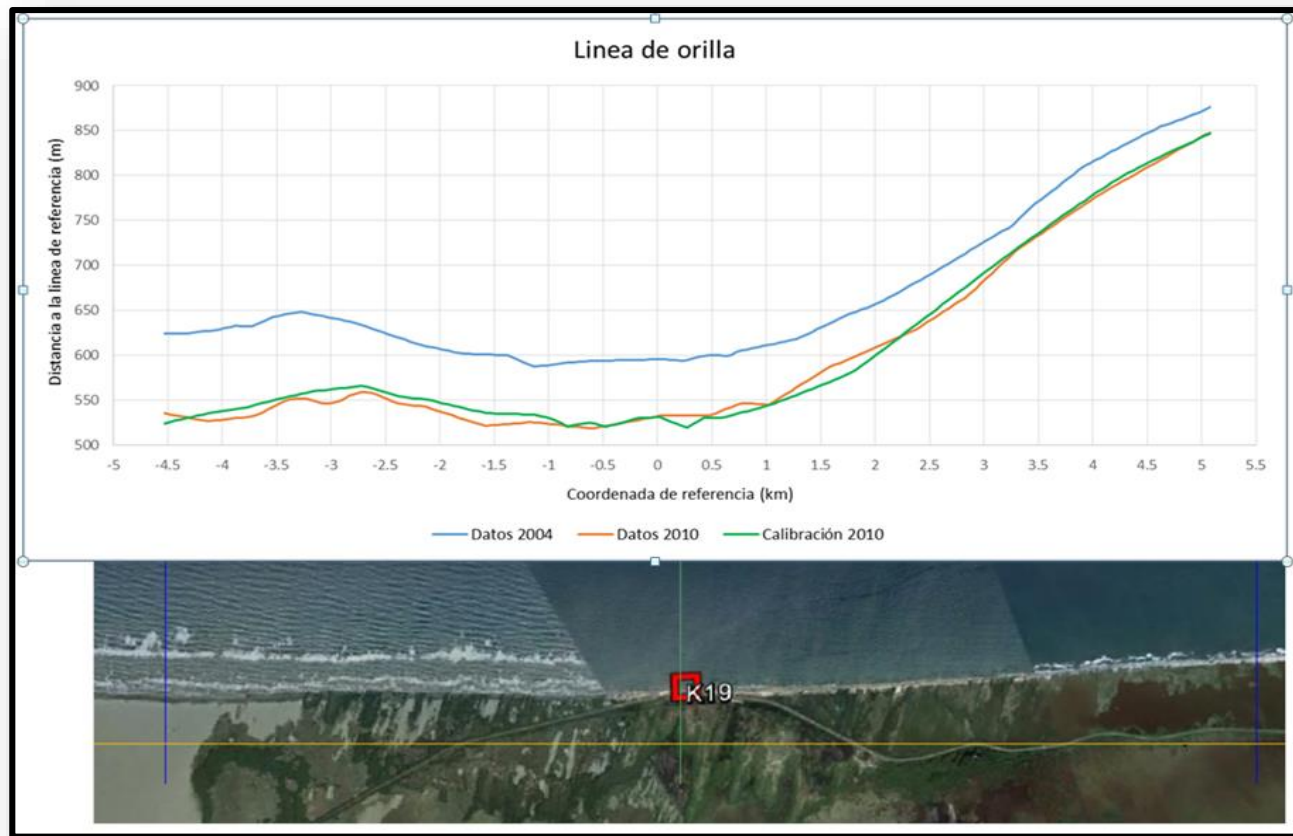
La Tabla 3-1, muestra la profundidad de cierre calculada para qué boya que ha sido seleccionada.

**Tabla 3-1. . Profundidad de Hallermeier en los puntos de propagación del oleaje.**

Localización	Profundidad de Hallermeier (m)
Boya A	5.1
Boya B	5.0
Boya C	4.9
Boya D	4.6
Boya E	4.3

Los resultados del primer tanteo se pueden ver en la Figura 3-7 a 3-8. Los resultados en términos de transporte de sedimentos se dan referidos al transporte neto, que es prácticamente igual al transporte bruto en dirección Oeste (W), puesto que el transporte en dirección Este (E) es muy reducido.

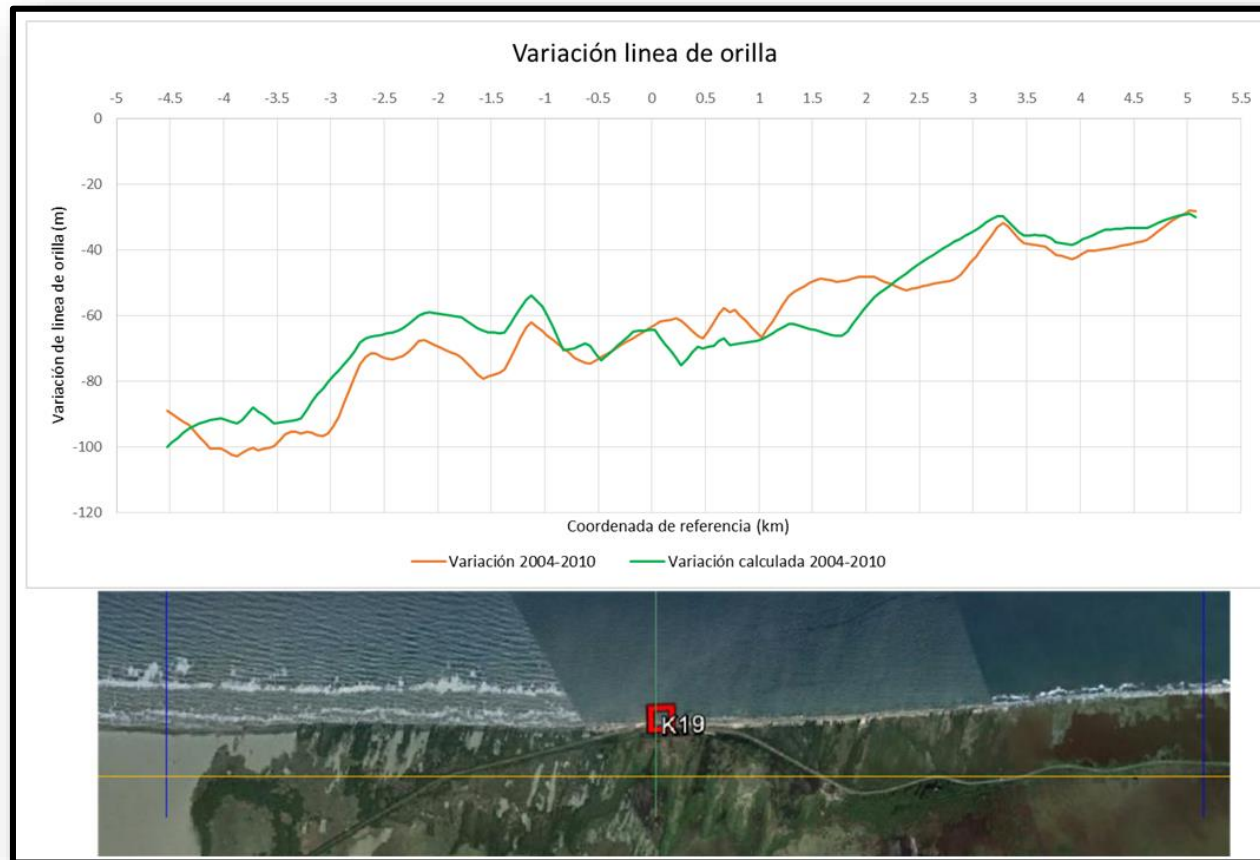
En este primer tanteo se obtiene  $K1=0.37$ ,  $K2 = 0.19$ . A pesar de que el ajuste de la línea de orilla es bueno (es la función objetivo de ajuste), los valores obtenidos para el transporte longitudinal de sedimentos son demasiado altos elevados y difícilmente explicables para el clima de oleaje que se presenta. El juicio crítico de estos resultados apunta que  $K1=0.37$ ,  $K2 = 0.19$  deben ser ajustados durante el proceso de calibración que se realizará más adelante.

**Figura 3-7. Calibración del modelo – tanteo inicial. Posición de línea de orilla.**

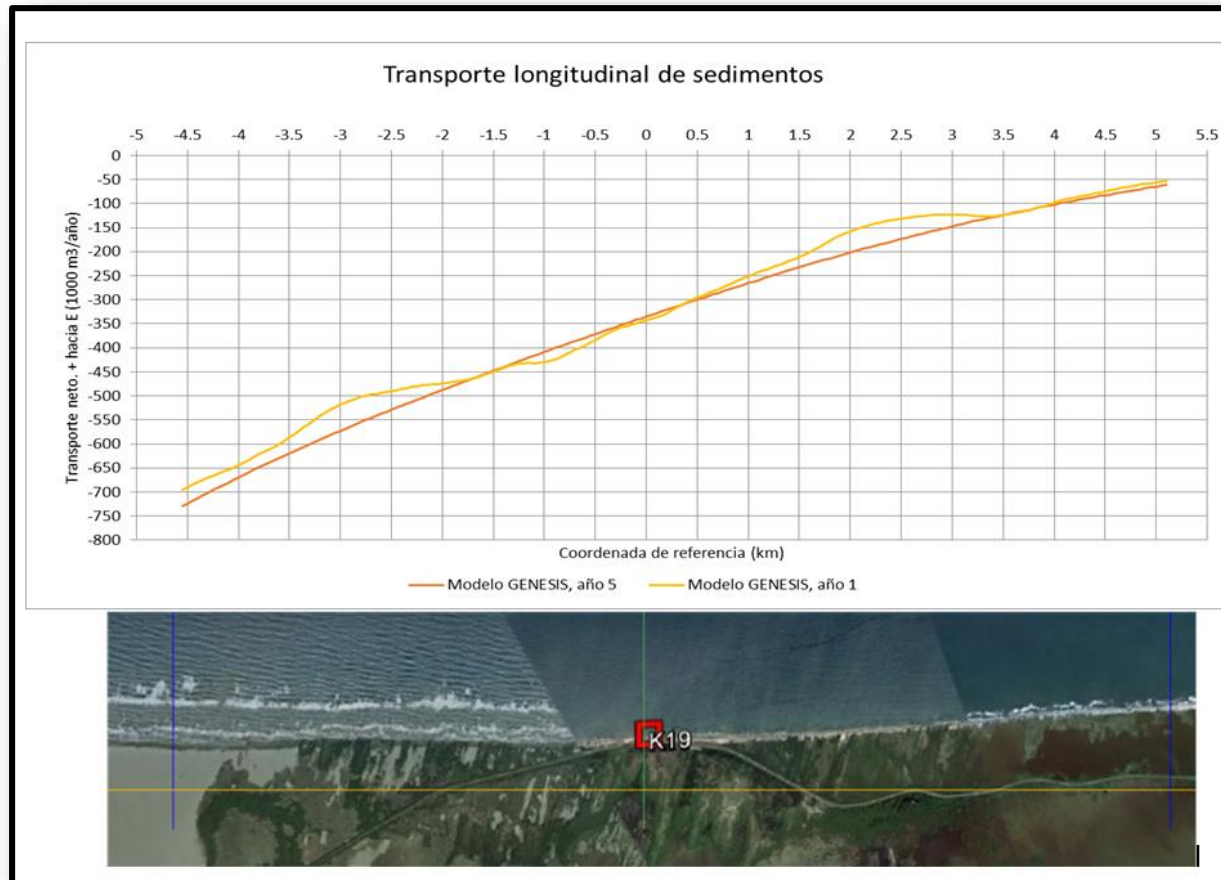
Fuente propia



**Figura 3-8. Calibración del modelo – tanteo inicial. Variación línea de orilla.**



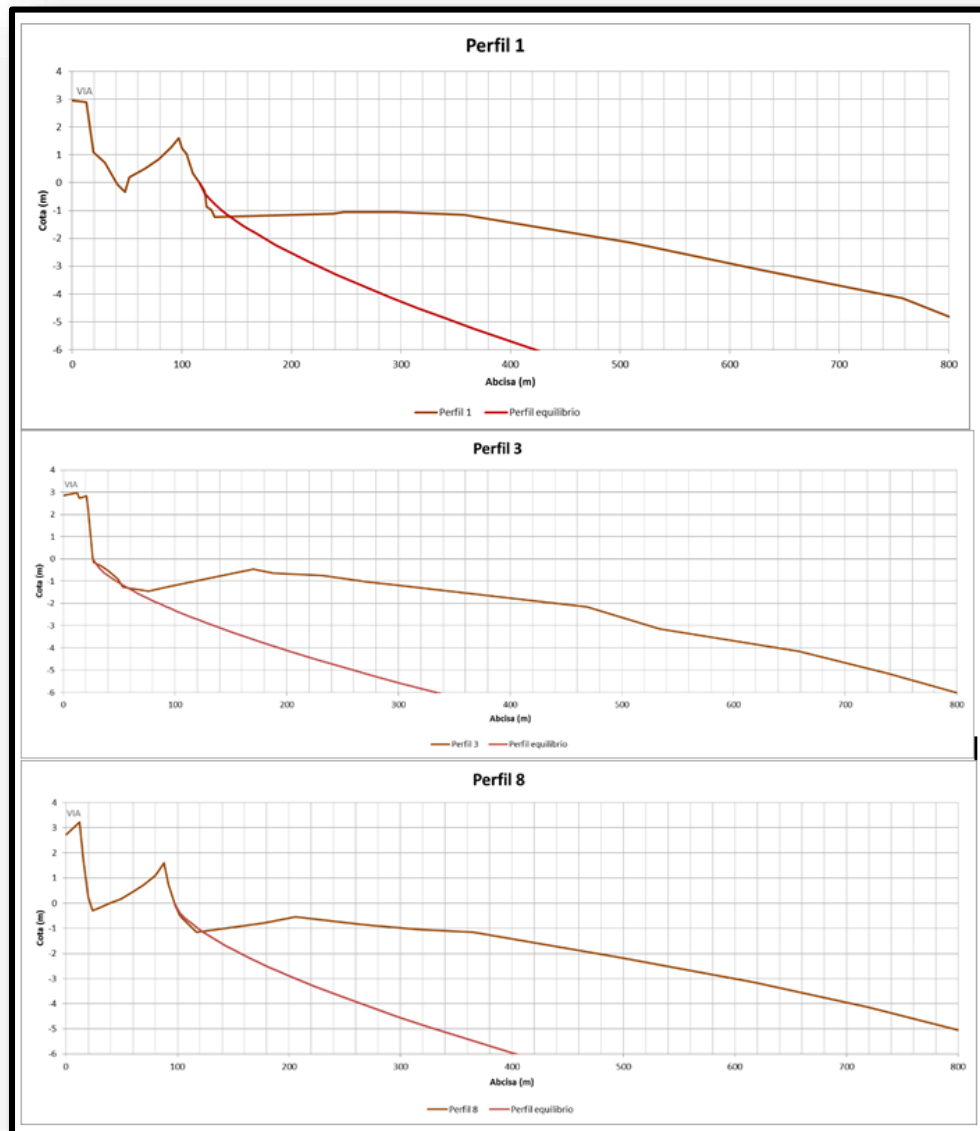
*Fuente: Propia.*

**Figura 3-9. Calibración del modelo – tanteo inicial. Transporte longitudinal de sedimentos.**

Fuente: propia.

Para tratar de contextualizar estos resultados se decidió analizar detalladamente el perfil de playa en la zona. La morfología del paleo-delta presenta profundidades muy reducidas a distancias relativamente grandes de la costa, en comparación con el perfil de equilibrio de Dean para el sedimento presente. La Figura 3-10 muestra tres (3) perfiles de playa característicos, comparados con los perfiles de equilibrio (de Dean) correspondientes.

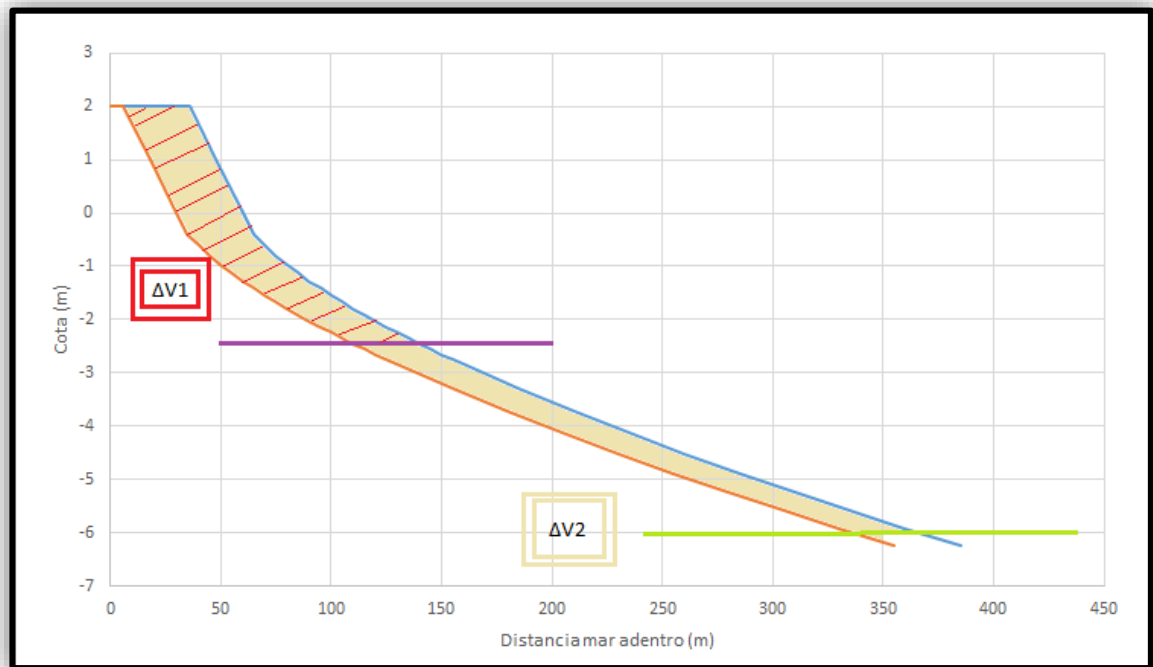
**Figura 3-10. Perfiles medidos y de equilibrio correspondientes a la línea de orilla actual**



*Fuente: propia.*

El elemento clave en los resultados obtenidos es la relación entre el volumen de sedimentos que pierde un perfil de playa ( $\Delta V$ ) y el retroceso de la línea de orilla ( $\Delta x$ ). Ver Figura 3-11 Esta relación tiene que ver con la altura del perfil activo de la playa, donde se moviliza y transporta el sedimento, que es la suma de la cota de la berma de la playa y la profundidad de cierre.

**Figura 3-11.** Relación entre pérdida de volumen y retroceso de la línea de costa, en función de la profundidad de cierre del perfil de playa.



Fuente: propia.

En el tanteo inicial del calibrado, se consideró que dicha altura era de 7 m aproximadamente (2 m de la berma superior y 5 m de profundidad de cierre). Sin embargo, las observaciones del perfil de playa muestran que la cota de la berma de playa es inferior (1.5 m) y que la profundidad de cierre es inferior (del orden de 2-2.5 m), por lo que la altura de la playa activa es del orden de 4 m.

Así, se ha repetido la calibración del modelo considerando estos nuevos parámetros, y se ha obtenido los mismos (excelentes) ajustes (ver figura 3-12 y 3-13) con los siguientes parámetros de la fórmula del CERC:  $K1 = 0.21$ ,  $K2 = 0.11$ .

En este caso, se ha obtenido además valores del transporte longitudinal neto de sedimentos (Figura 3-14) más acordes con los obtenidos en el análisis de dinámica litoral.

**Figura 3-12. Calibración del modelo. Posición de línea de orilla.**



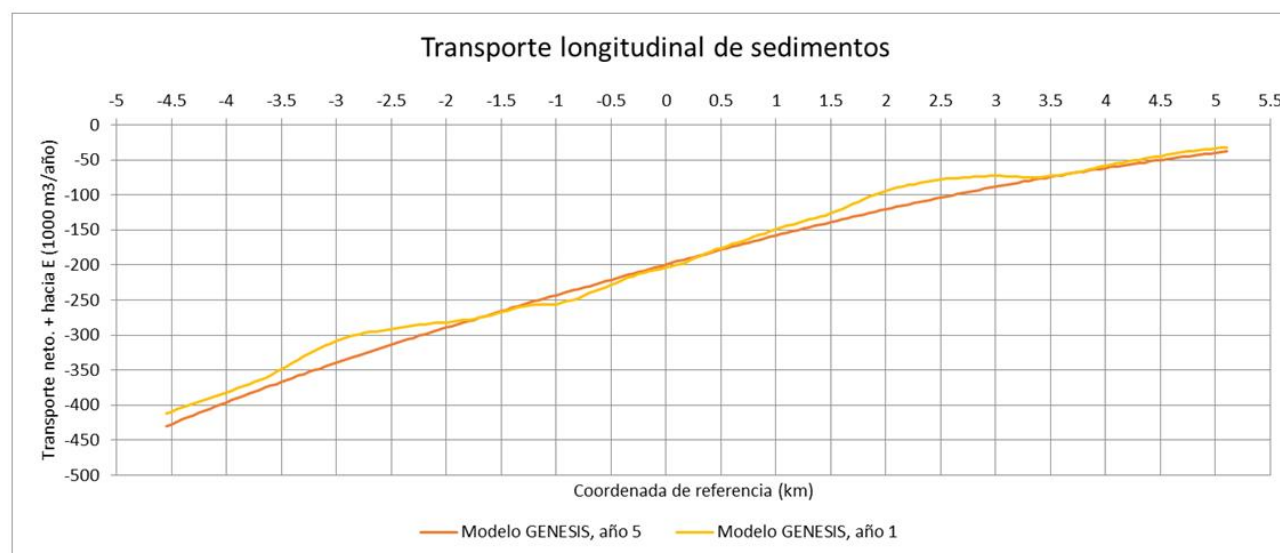
*Fuente: propia.*

**Figura 3-13. Calibración del modelo. Variación línea de orilla.**



*Fuente: propia*

**Figura 3-14. Calibración del modelo. Transporte longitudinal de sedimentos.**



*Fuente: propia*



### 3.3.3. Validación del modelo.

Con los parámetros calibrados según el apartado anterior, se procede ahora a verificar el ajuste del modelo a la realidad observable con los datos correspondientes al siguiente periodo temporal. La validación proporciona información útil sobre la bondad de ajuste (credibilidad de la modelación) que cabe esperar para el análisis predictivo del comportamiento de cada una de las alternativas.

En las simulaciones de validación se ha encontrado que la posición de la línea de orilla llega a alcanzar la vía. Para representar correctamente el fenómeno ocurrido, se consideró un muro de protección con enrocado (el cual fue construido en diciembre de 2014) que en términos prácticos impide a la línea de orilla seguir retrocediendo.

Los resultados obtenidos del proceso de validación son excelentes, con la única excepción del tramo más al Oeste, donde el modelo predice una menor erosión que la observada. Ello puede deberse a que esta zona corresponde a un sistema de cordones dunares (barra) de baja cota de coronación Figura 3-15, que retrocede fácilmente frente a la dinámica transversal del oleaje, aspecto éste que no considera el modelo Genesis.

Las figuras 3-16 a 3-18, muestra los resultados de la validación del modelo.

**Figura 3-15. Sistema de cordón dunar (barra) al oeste del Km-19.**



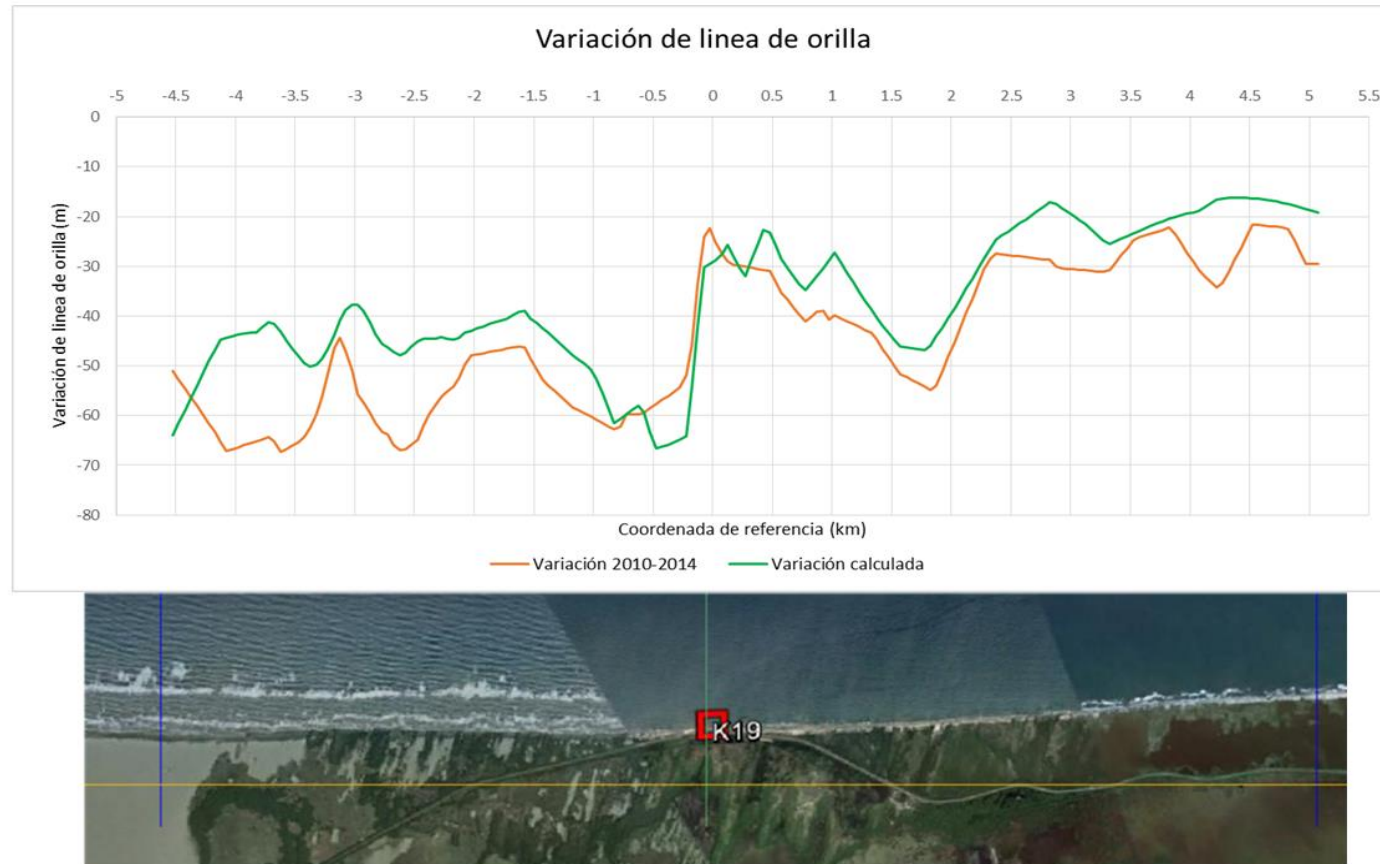
*Fuente: propia*

**Figura 3-16. Validación del modelo. Posición de línea de orilla.**

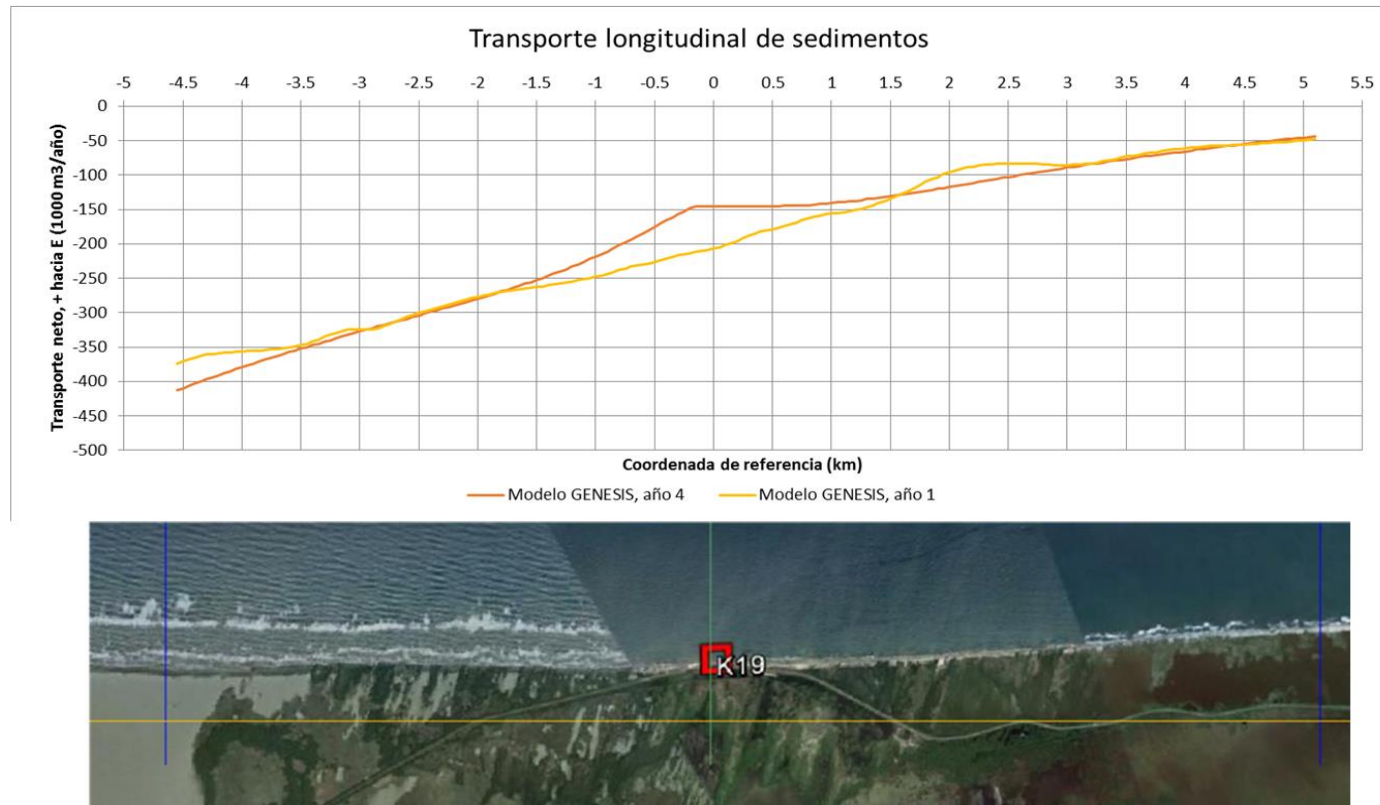


*Fuente propia.*

**Figura 3-17. Validación del modelo. Variación línea de orilla.**



*Fuente: propia.*

**Figura 3-18. Validación del modelo. Transporte longitudinal de sedimentos.**

*Fuente: propia.*

### **3.3.4. Determinación de la evolución futura de la línea de costa.**

Del análisis anterior con los resultados de la calibración y validación del modelo, se obtuvieron los parámetros  $K1 = 0.21$ ,  $K2 = 0.11$ , para las simulaciones con el modelo en el Largo plazo. Estos parámetros se incluyeron para simular la costa en el tramo de estudio que hace parte de la investigación, para la escalas en el largo plazo a definir más adelante.

#### **Definición de Las Escala Espacial y Temporal de los Procesos**

Los análisis del estudio que estamos realizando se enmarcan en diferentes escalas de tipo espacial y temporal. Referente a la escala espacial, nos encontramos en la de tipo Macroescala (km), mientras que en la escala temporal en el largo plazo (años).

De allí, que es adecuado el uso de un modelo de largo plazo que considere en su concepción numérica estas escalas. No existe indicativo que defina a cuantos años corresponde el largo plazo, más que el criterio del tipo de proceso que se está evaluando. Para el caso de ingeniería de costa, y con las limitantes de los modelos morfológicos en los cuales para pronósticos de eventos de muy larga duración dejan ser fiable por la acumulación de errores, hemos definidos los siguientes criterios de escalas temporales, a simular en el modelo:

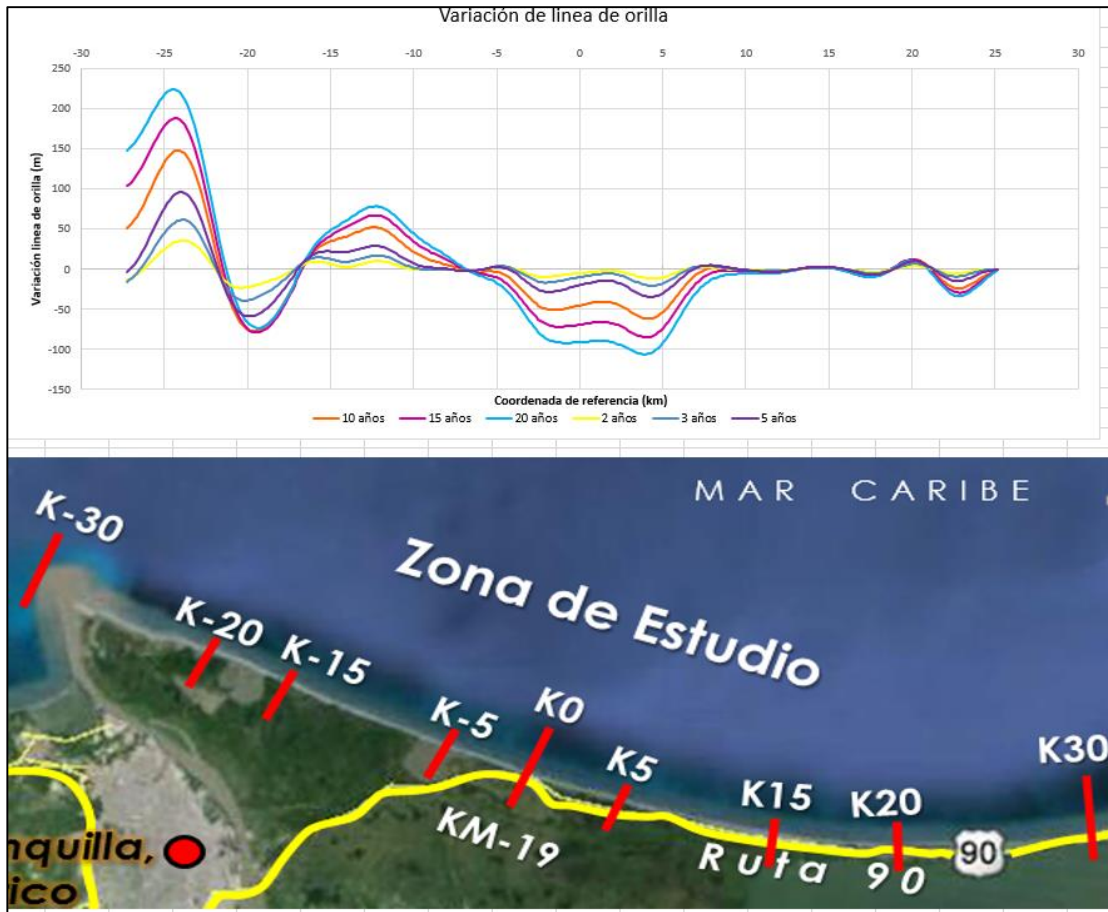
- **Corto Plazo:** Menor a 3 años.
- **Medio Plazo:** 5-10 años.
- **Largo Plazo:** 10 – 20 años.

#### **Resultados de la modelación numérica en la escalas consideradas**

La Figura 3-19 muestra los resultados de las líneas de costa para diferentes años evaluados en las escalas temporales analizadas. Se denota que los procesos erosivos en la costa alcanzan a llegar a valores de hasta 100 m de retroceso para un escenario de hasta 20 años. Para el caso de la zona en sedimentación basado en el balance de sedimentos se alcanza valores de variación de la playa de hasta 200 m. Para el caso del tramo inicial K25 a K10, la zona presenta una variación muy reducida denotando que está próximo a un equilibrio dinámico.

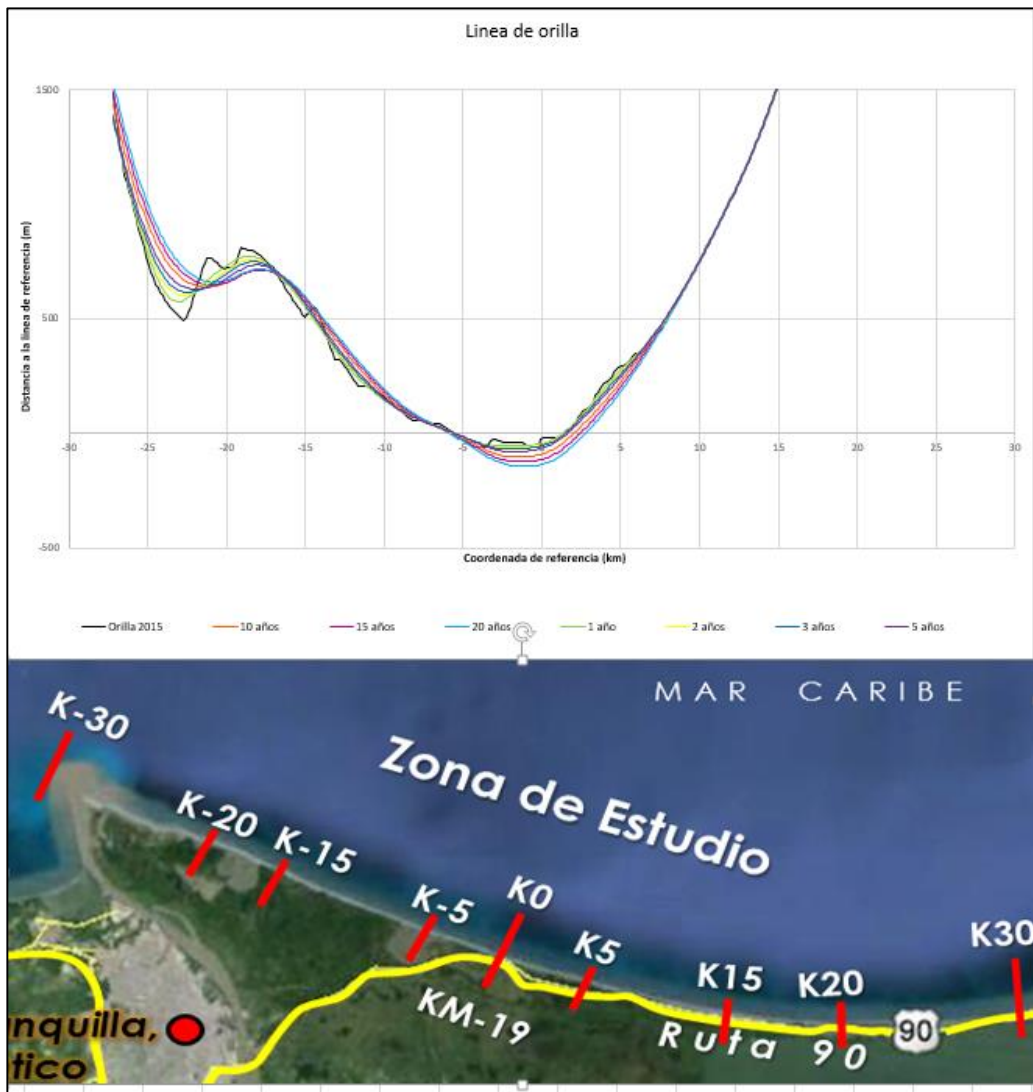


**Figura 3-19. Variación del transporte longitudinal de sedimentos partir de la evaluación de la línea de orilla.**



Fuente: Propia.

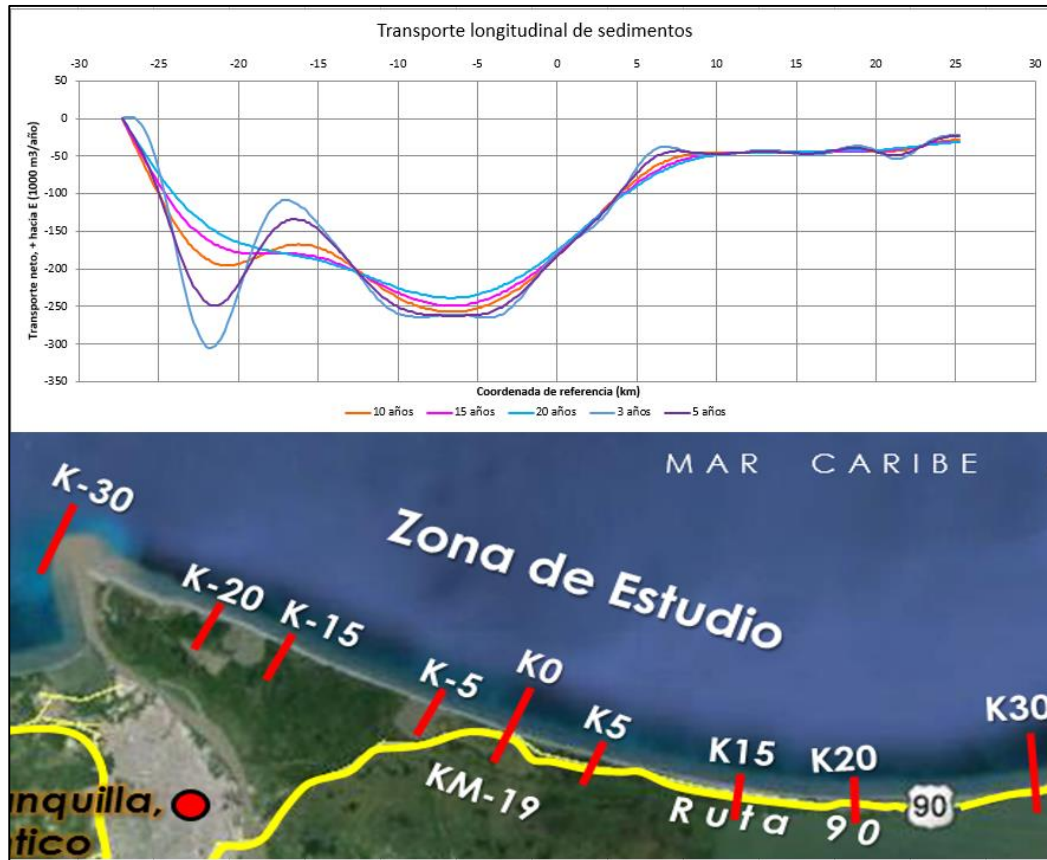
La Figura 3-20 muestra la tendencia de la costa para los diferentes años evaluados referidos a una misma línea de referencia. El tramo inicial sigue mostrándose en equilibrio, mientras la costa se retrocede en la misma forma actual, siendo más notable en el sector de K7.5 a K-5. Se observa adecuadamente el proceso de sedimentación de la barra próxima a Bocas de Cenizas.

**Figura 3-20. Variación de la línea de orilla con respecto a la de referencia.**

Fuente: Propia.

La Figura 3-21, muestra la variación del transporte de sedimentos para los diferentes años calculados. Se denota que un valor constante entre K25 a K5, donde sigue denotándose el equilibrio, en cambio existe alta variabilidad desde K7.5 al K-25.

Figura 3-21. Variación del transporte longitudinal de sedimentos.



Fuente: Propia.

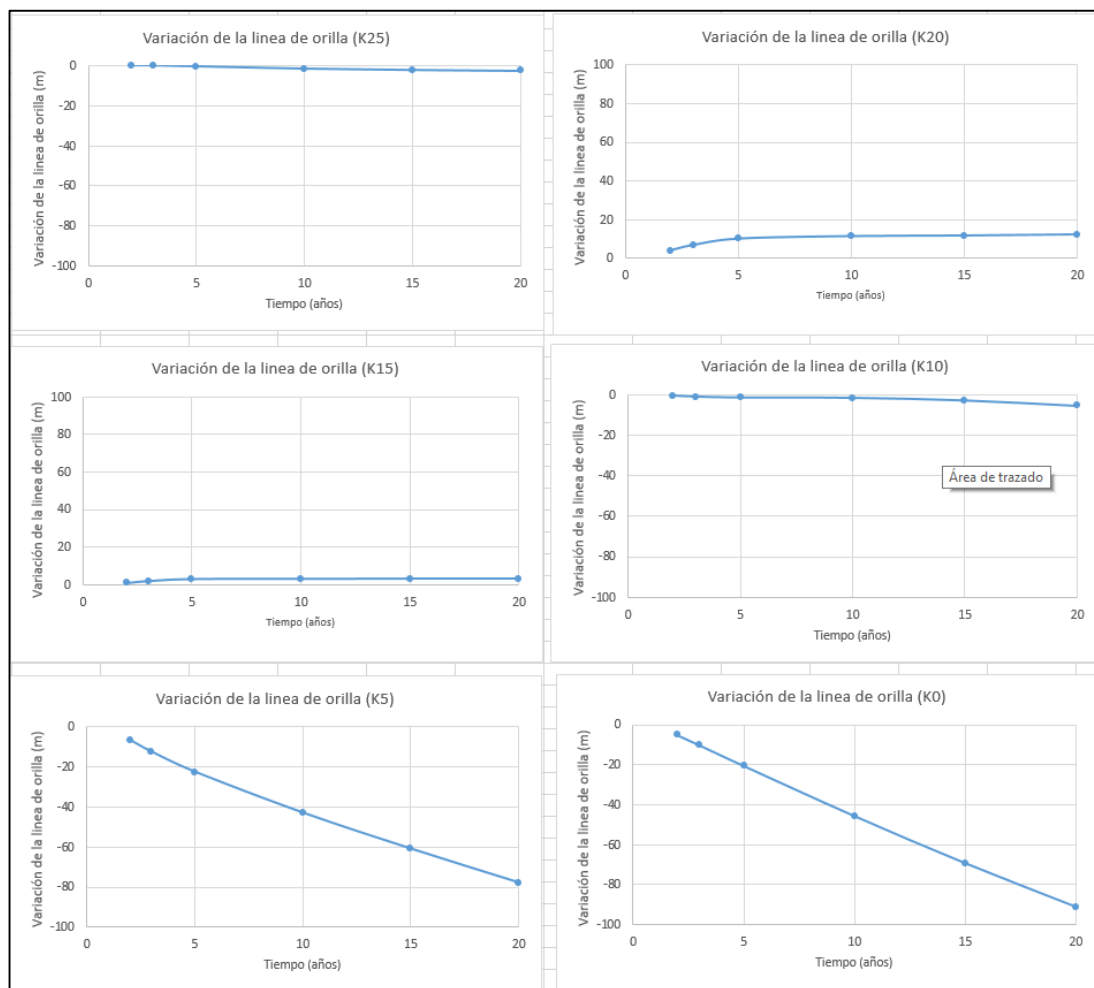


### Análisis de resultados

A manera de comprender mejor los resultados, que son difíciles de interpretar en las salidas gráficas del modelo en planta, y poder hacer proyecciones de las tendencias de la costa inclusive a un plazo mayor al simulado con el modelo numérico, se definieron puntos de control a cada 5.0 km, en los cuales se dibujaron las variaciones de la línea de costa con respecto al tiempo. Así mismo, en estas gráficas se podrá observar cuál es su tendencia de la costa y comprender si está próxima al equilibrio, o por lo contrario no muestra ningún comportamiento que infiera este indicativo.

La Figura 3-22 muestra la evolución de la costa para el largo plazo, en diversos puntos del tramo localizado al Este del K0 (K0 a K+25).

**Figura 3-22. Variación Línea de Orilla en el tiempo tramos Abscisas K0 a K+25**

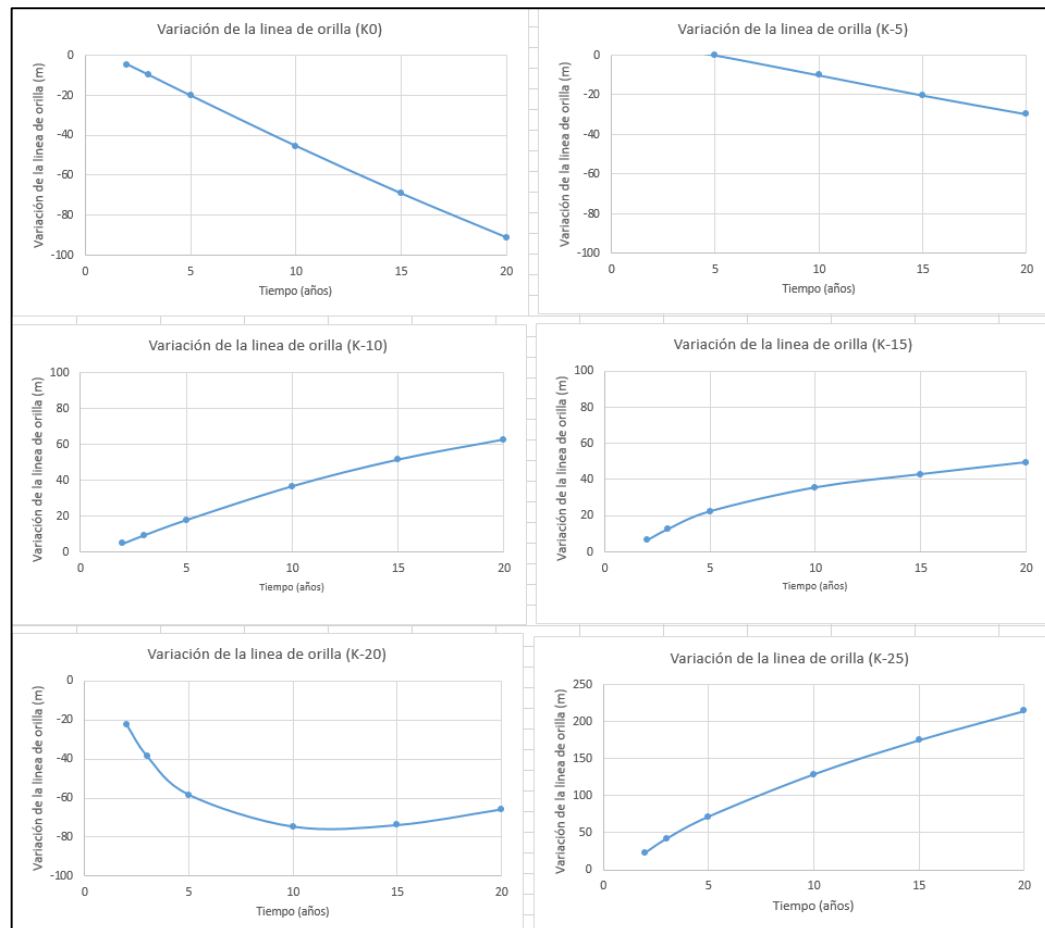


Fuente: Propia.

Con base en las gráficas anteriores, presentamos a continuación los siguientes comentarios relevantes:

ABSCISA Punto (KM)	COMENTARIOS
K25	La curva que representa la evolución de la línea de costa en el tiempo denota que la erosión, muy reducida, tiende a desaparecer a corto-medio plazo (del orden de 5-10 años), alcanzándose finalmente una condición de equilibrio.
K20	Comportamiento similar que en el K25, pero en este caso, con una ligera acreción.
K15	Comportamiento similar que en el K20.
K10	En este punto la evolución de la línea de costa (erosión suave) es uniforme, sin tendencia a llegar a un punto de equilibrio (variación nula).
K5	Comportamiento similar al del K10, con un proceso erosivo mayor y tasas más altas de retroceso de la línea de costa. En este caso, se observa que la pendiente de la curva decrece con el tiempo, lo que apunta a la existencia de un punto de equilibrio (pendiente nula) en un plazo del orden de 100 años, aproximadamente.
K0	Comportamiento muy similar, en magnitud y tendencia, al del K5.

La Figura 3-23 muestra la evolución de la costa para el largo plazo, en diversos puntos del tramo localizado al Oeste del K0 (K0 a K-25).

**Figura 3-23. Variación Línea de Orilla en el tiempo tramos Abscisas K0 a K-25.**

Fuente: Propia.

Con base en las gráficas anteriores, presentamos a continuación los siguientes comentarios relevantes:

ABSCISA TRAMO (KM)	COMENTARIOS
K-5	Comportamiento similar al K0 pero con menores tasas de erosión. En este caso no se observa una tendencia al equilibrio en el escenario de tiempo considerado (20 años).
K-10	La evolución futura de la línea de costa (de tipo acumulativo) tiene pendiente variable, con tendencia a presentar un punto de equilibrio (pendiente nula) en torno a los 50 años aproximadamente.
K-15	Comportamiento en este punto similar al del K-10.
K-20	El comportamiento en este punto es de 2 tipos: erosivo en los próximos 10 años, y acumulativo a partir de entonces. Es difícil predecir la evolución futura, y su posible llegada a un punto de equilibrio, que deberá determinarse en base al de sus tramos adyacentes.
K-25	Comportamiento similar al de los puntos K-10 y K-15, de tipo acumulativo, pero con tasas mayores de avance de la línea de costa.

De forma general, la evolución futura de la línea de costa en la barra de Salamanca, con base a los resultados de la modelación numérica realizada, puede resumirse en los siguientes puntos:

- **K+25 a K+15:** Estabilización progresiva de este tramo de costa, que alcanzará su punto de equilibrio dinámico en el medio plazo (10 años).
- **K+10 a K-5:** Erosión progresiva de la línea de costa, prácticamente uniforme en el corto y medio plazo, que tiene a una posición de equilibrio en el muy largo plazo (superior a 100 años).
- **K-10 a K-25:** Acreción progresiva de la línea de costa, con una tendencia a la estabilización en el largo plazo, del orden de 50 años.

## 4. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. CONCLUSIONES

- El análisis de la dinámica de barras litorales no es un tema sencillo ya que los cambios morfológicos, depende de las características propias del sistema en estudio.
- La Barra de Salamanca, muestra que tiene una condición especial a diferencia de otras barras litorales, y esto se debe a que se ubica en una zona que hace parte del antiguo delta del río Magdalena afectado por una plataforma de baja profundidad que influye en sus cambios morfológicos.
- Los procesos erosivos de la barra de Salamanca, se debe a procesos naturales, asociados a la acción del oleaje en un tramo costero con abundancia de sedimentos aportados de las antiguas desembocaduras del río Magdalena, y la falta de suministro actual de sedimentos por parte del sistema. Se identificaron que los cambios en la línea de costa se han producidos desde hace más de 100 años, siendo visible en la última década debido a que ha sido afectada en parte la infraestructura existente.
- Otro indicativo de que la barra de Salamanca está en continua evolución, se refiere en el crecimiento de la barra marina frente a Bocas de Cenizas, causado por el transporte longitudinal de sedimentos de este a oeste. Esta afectación causa problemas para la zona portuaria de Barranquilla en el ingreso seguro de las embarcaciones marítimas.
- Las causas del retroceso de la línea de costa, se deben a dos procesos bien identificados: el que tiene que ver con el retroceso de la barra por la acción directa del oleaje cuando se presenta grandes temporales (overwash), que sobrepasan la baja cota de la barra, y el asociado a la variación del transporte longitudinal de sedimentos.
- Los efectos morfodinámicos asociados al fenómeno de “overwash”, puede producir el retroceso de la línea de costa sin que exista una pérdida neta del sedimento en el perfil completo de playa.
- El aspecto de mayor relevancia que produce los principales efectos sobre la morfología costera de la barra, son los debidos a la variación del transporte longitudinal de sedimentos.

- El principal responsable de la variación del transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la costa, es el Oleaje. La presencia de la zona de baja profundidad y zona somera (lóbulos I y II) producto del antiguo delta del río Magdalena, incide notablemente en la transformación del oleaje a medida que se propaga hacia la costa (refracción, difracción, asomeramiento, etc.), de tal manera que se produce una distribución irregular de las condiciones del oleaje a lo largo de la costa en estudio.
- El clima marítimo muestra que los oleajes que llegan a la zona de estudio son muy erosivos del orden del 84 %. Los meses de mayor altura de ola se presenta en la época de vientos alisios entre Diciembre a Mayo.
- La dirección predominante del transporte de sedimento neto de Este a Oeste, y va aumentando a medida que se avanza hacia el Oeste (Bocas de Cenizas). El cálculo de la tasa de transporte de sedimentos muestra cómo crece a medida que se avanza hacia el Oeste, desde K30 donde son pequeños hasta el K0 y así sucesivamente hasta Bocas de Cenizas. Es interesante ver el efecto del lóbulo II (K-5 a K-18), en donde el transporte de sedimento presenta los mayores valores que corresponde significativamente con las zonas de mayor erosión identificadas en el estudio. Finalizando este tramo, se evidencia un decaimiento del transporte hacia el KM-20, luego se acelera hacia la zona acumulativa existente por efecto de la estructura del tajamar oriental en Bocas de Cenizas.
- El perfil representativo para el tramo de mayor erosión en el sector de K0, denota que no hay ajuste al perfil de equilibrio, y que tiene una condición rara debido a que aparece una barra sumergida, que no permite que el perfil de playa activo se desarrolle en toda su longitud (profundidad), mostrándose un perfil de playa apoyado sobre una plataforma de profundidad reducida.
- La barra en sí misma, tiene un mecanismo natural de adaptación ante la presentación de los procesos erosivos asociados a la energía del oleaje, de tal manera que las lagunas y ciénagas que se encuentran tras ella, se reajustan cuando se presentan estos fenómenos.

#### **4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

- El resultado del ajuste del modelo de forma en planta de equilibrio (Hsu – Evans), muestra que el sector ubicado en el tramo de K+25 a K+15, está próximo a esta condición, mientras que de allí hasta Bocas de Cenizas no presenta un estado de equilibrio. La representación de la línea de costa indica que los mayores procesos

se ubican alrededor del K0 y define parte de la zona acumulativa en el tajamar oriental de Bocas de Cenizas.

- La evolución futura de la costa en el Largo plazo a partir de modelo numérico muestra los siguientes resultados:
  1. **K+25 a K+15:** Estabilización progresiva de este tramo de costa, que alcanzará su punto de equilibrio dinámico en el medio plazo (10 años).
  2. **K+10 a K-5:** Erosión progresiva de la línea de costa, prácticamente uniforme en el corto y medio plazo, que tiene a una posición de equilibrio en el muy largo plazo (superior a 100 años).
  3. **K-10 a K-25:** Acreción progresiva de la línea de costa, con una tendencia a la estabilización en el largo plazo, del orden de 50 años.

#### **4.3. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION**

Como resultados del presente estudio, se propone una serie de líneas de investigaciones que se pueden definir a futuro para el estudio de morfodinámica de barra que se pueden ejecutar en la Barra de Salamanca:

- Efecto del perfil de playa debido al proceso de overwash y contribución en la morfodinámica costera.
- Efectos hidráulicos en la morfodinámica costera de la rehabilitación del paleodelta del río Magdalena como fuente de sedimentos para la Isla de Salamanca.
- Valoración de la barra de Sedimentos en Bocas de Cenizas y uso como fuente de sedimentos para transvase de arena en la Isla de la Salamanca.
- Implementación de sistemas de monitoreo y seguimiento del estado morfodinámico de la Isla de Salamanca, para establecer tendencias en el largo plazo.

## 5. BIBLIOGRAFIA

A. Sanchez-Arcilla', JA. Jiménez (1997), Impact of Climatic Change on NW Mediterranean Deltas. (Evolución del delta del Ebro)

Alvarado Ortega, Manuel. (2009) – Director IDEHA Universidad del Norte. Barranquilla, ciudad con Río y Mar.

AQUA & TERRA – OCEANMET LTDA – MNP S.A, 2010. Estudios y Diseños para la construcción de Estructuras de Protección Costera para controlar los procesos erosivos entre Bocas de Ceniza y Punta Betín, Departamento del Magdalena. Estudios Oceanográficos – Meteorológicos – Batimétricos y Geomorfológicos.

BRUNN, P. (1954): «Coast erosion and the development of beach profiles», Beach Erosion Board, Tech. Memo, n.o 44.

César Vidal, Miguel A. Losada 2001, Raúl Medina e Íñigo Losada. MODELOS DE MORFODINÁMICA DE PLAYAS.

DEAN, R. G. (1977): «Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and gulf coasts», Ocean Eng. Tech. Rep., n.o 12, Univ. of Delaware.

Dean, R.G., (1973). Euristic Models of Sand Transport in the Surf Zone. Proc. Conf. on Engineering Dynamics in the Surf Zone, Syney, N.S.W., pp. 208-214.

DIMAR, 2003. Informe Final del Proyecto: “Estudio de la Línea de Costa entre Bocas de Ceniza y la Boca del Río Toribío”. Armada Nacional – Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Cartagena de Indias D.T. y C. Junio de 2003.

Dr. Mary-Louise Byrne, 2010 Presentación “Dune Evolution and Local Climate Change in Isla Salamanca National park, Colombia”. Por Juan Felipe Gómez. Masters Candidate Environmental Studies and Geography.. Associate Professor Wilfrid Laurier University.

Gómez Ramírez, 2011. Caracterización Geomorfológica y de Procesos Erosivos del Cordón de Dunas entre los Km 26 y 28 de la vía Parque Isla de Salamanca – VIPIS, Departamento del Magdalena.

GONZÁLEZ, E. M. (1995): Morfología de Playas en Equilibrio: Planta y Perfil. Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria. Santander.

Hanson & Kraus, 1989. “GENESIS, Generalized Model for Simulating Shoreline Changes”



HSU, J. R. C. and C. EVANS (1989): «Parabolic Bay Shapes and Applications», Proc., Institution of Civil Engineers, London, England, vol. 87 (Part 2), 556-570.

HSU, J. R. C. and C. EVANS (1989): «Parabolic Bay Shapes and Applications», Proc., Institution of Civil Engineers, London, England, vol. 87 (Part 2), 556-570.

HSU, J. R. C., R. SILVESTER and Y. M. XIA (1987): «New Characteristic of Equilibriumshaped Bays». In: Proc. 8th Austral. Conf. on Coast & OC. Engrg., 140-144.

INMAN, D. L. (1953): «A real and seasonal variations in beach and nearshore sediments

INVEMAR, 2012. Monitoreo de la Playa entre el Kilómetro 19 y 20 de la vía Barranquilla (Atlántico) – Ciénaga (Magdalena). Informe Final de Investigación. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés”

INVEMAR, 2013. Monitoreo de las Obras de Protección Costera ejecutadas en Costa Verde, Isla del Rosario y Km 19 carretera Ciénaga – Barranquilla. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés”

INVEMAR., Octubre de 2014 Características geomorfológicas de la zona costera y diagnóstico de la erosión en la Barra de Salamanca (Sitio nuevo, Pueblo Viejo y Ciénaga – Magdalena). Programa Geociencias Marinas y Costeras. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” .

Kaufmann y Hevert 1973, El régimen fluviométrico del Río Magdalena y su importancia para la Ciénaga Grande de Santa Marta. Por. Mitt Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient. Santa Marta, Octubre de 1973.

KOMAR, P. D. and W. G. MCDUGAL (1994): «The analysis of exponential beach profiles, Journal of Coastal Research, 10-1, pp. 59-69.

Kamphuis, J.W., 1991. Alongshore sediment transport rate. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 117, p. 624-640

LEO C. VAN RIJIN, (2013). LONGSHORE SAND TRANSPORT

LEO C. VAN RIJIN –S BOER (2006) «the effects of grain size and bottom slope on sand transport in the coastal zone

LEO C. VAN RIJN. Simple general formulae for sand transport in rivers, estuaries and coastal waters

LEO C. VAN RIJN, (1991) Balkema Rotterdam. Sediment transport in combined currents an waves

LEO C. VAN RIJN, (1996). Sediment Transport and Budget of the central Coastal zone the Holland

LEO C. VAN RIJN. (2013) The State of the art in Sediment Transport Modelling.

LEO C. VAN RIJN, (2013). Design of hard coastal structures against erosion.

LEO C. VAN RIJN, (2013). Coastal Erosion Control Based on the Concept of Sediment Cells.

OCEANMET LTDA – MNP S.A., 2010. Estudio de Impacto Ambiental. Diseño y Construcción de Estructuras de Protección Costera para Línea de la Costa entre Bocas de Ceniza y Punta Betín, Departamento del Magdalena.

RUBÉN DARÍO MONTOYA RAMÍREZ - ANDRÉS OSORIO ARIAS, (2007). Estados del arte: Los modelos de generación de oleaje de viento: características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia.

R. MEDINA, C. VIDAL, M. GONZÁLEZ, 2001. Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de «Equilibrio» Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas.

SILVESTER, R. (1960): «Stabilization of Sedimentary Coastlines», Nature, 188 (4749), 467-469.

USACE (1984). SHORE PROTECTION MANUAL

(2003), the Slapton Line Partnership (<http://www.slaptonlinepartnership.co.uk/>) commissioned a major study to make a comprehensive evaluation of the issues relating to coastal processes at Slapton Sands.

Tavera y Escobar, 2001. Caracterización de la Vegetación de la Vía Parque Isla de Salamanca, Magdalena – Colombia.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA US, (2000). Documento de referencia volumen 1 Dinámicas

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA US, (2000). Anexo Sección 7. Estados del arte los modelos de evolución de playas.

SISCO INGENIERIA – Alcaldía de Ciénaga, (2014): Diseño de las obras de protección en el Malecón del Municipio de Ciénaga, Magdalena.

SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena, (2014): Diseño de las obras de protección en el corto plazo para el KM-19 en la vía que conduce de Barranquilla a Santa Marta. Magdalena.

SISCO INGENIERIA – Gobernación del Magdalena, (2014): Diseño de las obras de protección medio y largo plazo para la protección del KM-19 en la vía que conduce de Barranquilla a Santa Marta. Magdalena.

Von Erffa, 1973. La sedimentación, el Transporte y la Erosión en la Costa Norte de Colombia entre Barranquilla y la Sierra Nevada de Santa Marta.

Wiedemann. Mitt Inst. Colombo-Alemán Invest, 1973. Distribution and Depositional History of some Pre-lagoonal Holocene Sediments in the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. By Arthur D. Cohen and Hartmut U.. Cient.